В. В. МЕЩЕРЯКОВ и И. М. ЧЕНЦОВ

ПЕРЕСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН



Государственное энергетическое издательство

Москва 1950 Ленинград

Rev. 02 15 Sep. 2022

В книге приведены типы обмоток машин постоянного и переменного тока с примерами составления схем обмоток, изложены методы пересчета машин постоянного тока и асинхронных электродвигателей на другие режимы работ и поверочные расчеты машин, не имеющих паспортных и обмоточных данных, с практическими примерами. Книга предназначена для лиц, занятых ремонтом и перемоткой электрических машин.

Предисловие.

Предлагаемая читателям книга является практическим руководством по расчету электрических машин постоянного тока и асинхронных двигателей при ремонте и перемотке их с измененными техническими данными. Приводятся простые, доступные для практиков методы пересчета электрических машин на другие напряжения и числа оборотов. Авторы использовали свою практику в области расчетов и ремонта электрических машин и обмоточные данные, собранные в течение нескольких лет работы.
Эта книга может служить пособием прежде всего для производственников, занятых ремонтом и перемоткой электрических машин. Книга состоит из введения и четырех глав. Во введении дается краткий обзор истории развития машиностроения электрических машин.
В первой главе рассмотрены обмотки машин постоянного тока и их схемы, во второй главе – пересчет машин постоянного тока, в третьей главе – обмотки машин переменного тока и их схемы, в четвертой – пересчет асинхронных двигателей.

Между авторами работа была распределена следующим образом: инженером–электриком В. В. Мещеряковым написан текст книги и обработано 70% помещенных в приложении таблиц, а И. М. Ченцовым обработано 30% таблиц.

Важное замечание.

В настоящем электронном варианте не приводится массив таблиц с техническими, обмоточными данными устаревших электродвигателей 40 – 50-х годов 20 века, приведенных в оригинальном издании. Вызывают сомнения сведения касающиеся приоритетов изобретений. Для получения информации о новых материалах, применяемых при ремонте, а также требованиях действующих государственных стандартов следует обращаться к современным источникам.

Содержание:

Введение.

1. Краткий обзор развития электромашиностроения.

Электрические машины первого периода были магнитоэлектрическими машинами переменного тока, без коллектора с неподвижными постоянными магнитами подковообразной формы. Они предназначались для освещения маяков электрической дугой. Источником механической энергии служила паровая машина, соединенная с электрическим генератором ременной передачей. Развитие этих машин характеризуется постепенным изменением конструкции их якоря и магнитов. Динамо–электрические машины стали строиться после открытия в 1831 г. закона электромагнитной индукции исключительно в качестве генераторов переменного тока, весьма примитивной конструкции. В 1834 г. русский академик Б. С. Якоби построил первую машину постоянного тока с коммутатором. У первых электрических машин якорь представлял собой электромагниты с надетыми на них катушками. В таком исполнении он по форме напоминал корабельный якорь, откуда он и получил свое название. Затем якорь превратился в кольцо, обмотанное медной проволокой (кольцевой якорь, рис. 1), и только в конце прошлого столетия якорь стали выполнять с пазами, в которые вкладывалась обмотка (барабанный якорь, рис. 2). Конструкция барабанного якоря была дана русским электротехником П. Н. Яблочковым. Процесс усовершенствования конструкций машин постоянного тока идет дальше: находят способы улучшения коммутации и компенсации реакции якоря. Улучшение коммутации достигается, во–первых, заменой медных щеток на коллекторе угольными, обладающими большим контактным сопротивлением; во–вторых, построением дополнительных полюсов и введением компенсационных обмоток. Широкому внедрению переменного тока в значительной мере способствовало изобретение в 1882 г. И. Ф. Усагиным однофазного трансформатора. В 1889 г. русский инженер М. О. Доливо–Добровольский открыл трехфазный ток, а в 1890 г. сконструировал первый асинхронный электродвигатель трехфазного тока, который явился прототипом изготовляемых и по настоящее время асинхронных двигателей. Им же впервые разработаны и построены асинхронный короткозамкнутый электродвигатель с двойной беличьей клеткой, трехфазная синхронная машина и трехфазный трансформатор.

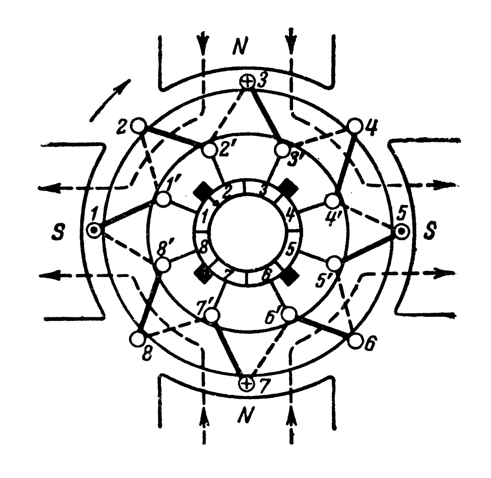


Рис. 1. Кольцевая обмотка якоря.

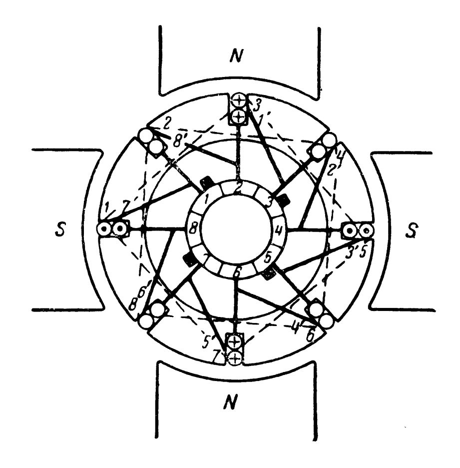


Рис. 2. Барабанная обмотка якоря.

Таблица 1.

Синхронное число оборотов в минуту, n_1, *об. мин.*	Номинальное напряжение *U*н					
	127/220	220/380	380	500	3000	6000
	Пределы мощностей, *квт*.					
600		41–175	41–350	41–400	100–600	250–500
750	2,5–15	2,5–175	2,5–350	2,5–400	100–750	250–600
1000	2,5–15	2,5–175	2,5–300	2,5–400	100–1000	250–750
1500	3–15	3–175	3–350	3–400	100–1500	250–1200

Развитие электромашиностроения, усовершенствование конструкции, вентиляции, применение более совершенной изоляции и активной стали позволили допустить более высокие электромагнитные нагрузки. Поэтому электрические машины как по весу, так и по габаритам уменьшаются. Например, асинхронный электродвигатель мощностью 3,7 *квт.* в 1893 г. весил 150 *кг.*, в 1903 г. – 105 *кг.*, в 1913 – 93 *кг.*, в 1926 г. – 64 *кг.*, в 1939 г. – 45 *кг.* Показательными типами электрических машин, характеризующими развитие электромашиностроения, являются двигатели завода ХЭМЗ типов Д и МА и завода "Электросила" – APRV и АД. Электродвигатель типа Д мощностью 11 *квт.*, 1450 *об. мин.* имел вес обмотки статора 19,6 *кг.*, а двигатель типа МА мощностью 10,5 *квт.*, 1460 *об. мин.* имеет вес обмотки лишь 5,6 *кг.* Электродвигатель типа APRV мощностью 10 *квт.*, 1440 *об. мин.* имел вес обмотки статора 11,1 *кг.*, а двигатель типа АД мощностью 10 *квт.*, 1450 *об. мин.* – только 5,1 *кг.* Отсюда видно, что по одной лишь активной меди двигателя современной конструкции вдвое и втрое легче.

В настоящее время электрические генераторы изготовляются на номинальные напряжения: 133, 230, 400, 525, 3300 и 6300 *в*, а электродвигатели на номинальные напряжения: 127, 220, 380, 500, 3000 и 6000 *в*. Электродвигатели трехфазные асинхронные с фазовым ротором мощностью до 1500 *квт.* изготовляются на 600, 750, 1000 и 1500 синхронных оборотов в минуту (ГОСТ В–1042–41).

Электродвигатели в зависимости от синхронного числа оборотов в минуту и номинального напряжения изготовляются в пределах мощностей, указанных в табл. 1. Электродвигатели на напряжения 127/220 и 220/380 *в* согласно ГОСТ В–1042–41 изготовляются с шестью выводными концами, а на напряжения 380, 500, 3000 и 6000 *в* – с тремя выводными концами, причем выводные концы электродвигателей должны быть расположены с правой стороны, если смотреть со стороны рабочего конца вала.

Заводами электропромышленности выпускаются серии электрических машин, имеющие различные области применения. Наибольшее распространение имеют асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором, отличающиеся простотой конструкции, большой надежностью в эксплуатации и отсутствием пусковых реостатов. Электродвигатели с контактными кольцами применяются только в тех случаях, когда источник питания не допускает больших пусковых токов и когда для привода требуется регулировка скорости вращения.

Электродвигатели постоянного тока сложнее и дороже асинхронных двигателей, однако они имеют то преимущество, что допускают экономичное и плавное изменение скорости вращения в широких пределах, неосуществимое для асинхронных электродвигателей. Генераторы постоянного тока служат для зарядки аккумуляторов, для электролиза и гальванопластики, а также применяются в качестве возбудителей для синхронных машин.

Глава первая.
Обмотки электрических машин постоянного тока и их схемы.
2. Классификация обмоток.

В машинах постоянного тока применяются следующие обмотки: обмотка якоря, обмотка главных полюсов, обмотка дополнительных полюсов и компенсационная обмотка. Для якорей современных машин исключительное применение имеют барабанные или цилиндрические обмотки. Барабанный якорь представляет из себя цилиндр, состоящий из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,5 *мм.* с выштампованными в них канавками или пазами, в которые укладывается обмотка.

В зависимости от схемы соединений обмотки якоря делятся на:

1) параллельные или простые петлевые.
2) последовательные или простые волновые.
3) сложно–петлевые.
4) сложно–волновые.
5) волновые обмотки с мертвыми секциями.
6) искусственно–замкнутые волновые обмотки.
7) ступенчатые обмотки.
8) комбинированные или "лягушачьи".

3. Простая петлевая (параллельная) обмотка.

Петлевой обмоткой якоря называется такая обмотка, обходя которую по схеме, мы совершаем поступательные и возвратные движения, образуя ряд петель (рис. 3). Например, провод, выйдя из первой коллекторной пластины (рис. 3, а), попадает в пазы 1 и 9, возвращается во вторую коллекторную пластину и затем в паз 2. Число параллельных ветвей простой петлевой обмотки равно числу полюсов машины:

$$2a \ = \ 2p$$

где: $2p$ – число полюсов; $2a$ – число параллельных ветвей.
При петлевой обмотке шаг по коллектору:

$$y\text{к} = \pm 1$$

где: знак **–** (минус) относится к левой или перекрещивающейся обмотке (рис. 3, в), знак *+* к правой или неперекрещивающейся обмотке (рис. 3, а и б). Обычно делают обмотку не перекрещивающейся для избежания витковых замыканий.
Шаг обмотки по пазам приблизительно определяется по формуле:

$$y\text{п} = \frac{z}{2p}$$

где: yп – шаг обмотки по пазам; z – число пазов; $2p$ – число полюсов.

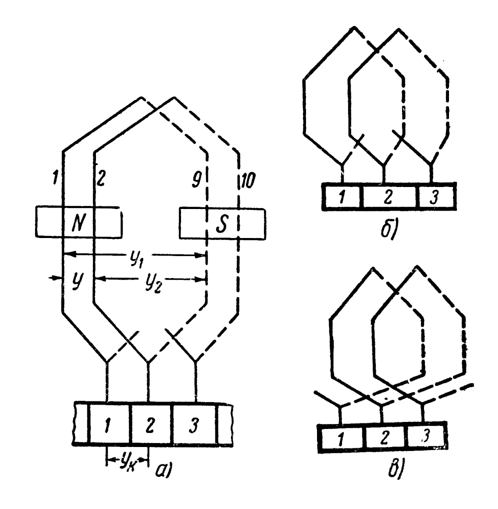


Рис. 3. Схема правой (а и б) и левой (в) петлевой обмоток.

Частичные шаги обмотки, выраженные числом пазов:
y_1 – первичный шаг обмотки.
y_2 – вторичный шаг обмотки.
Результирующий шаг:

$$y = y_1 - y_2 = 1$$

$$y_1 = \frac{z \pm b}{2p}$$

где: b – какое – либо целое число для получения шага выраженного целым числом:

$$y_2 = y_1 - yк$$

Число коллекторных пластин определяется:

$$k = \frac{z \times Sп}{2}$$

где Sп – число сторон секций обмотки в пазу, т. е. число выводных концов секций, присоединяемых к пластинам коллектора.

4. Простая волновая (последовательная) обмотка.

Волновой обмоткой якоря называется такая обмотка, обходя которую по схеме, мы совершаем движения, напоминающие волну, откуда обмотка и получила название волновой (рис. 4).

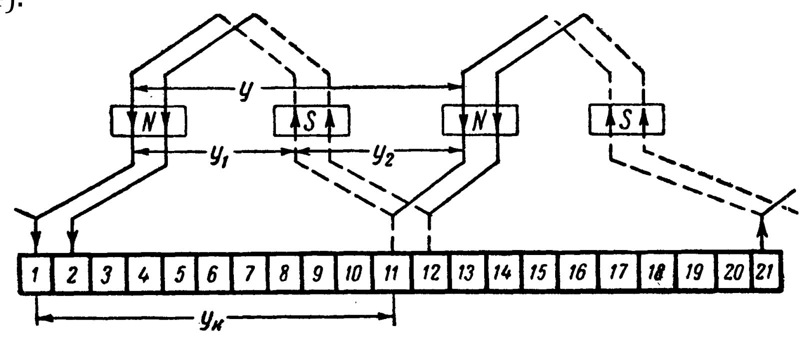


Рис. 4. Схема волновой обмотки.

Число параллельных ветвей волновой обмотки при любых числах полюсов машин равно 2:

$$2a = 2$$

Результирующий шаг:

$$y = y_1 + y_2 = \frac{z \pm b}{p}$$

Шаг обмотки по коллектору:

$$yк = \frac{k \pm a}{p}$$

знак **+** относится к перекрещивающейся обмотке, знак **–** к не перекрещивающейся, yк – шаг обмотки по коллектору, p – число пар полюсов, k – число коллекторных пластин, a – число пар параллельных ветвей (a = 1).

Частичные шаги обмотки, выраженные числом пазов:

$$y_1 = \frac{z \pm b}{2p} \qquad y_2 = y - y_1$$

5. Сложно – петлевая обмотка.

Сложно – петлевая обмотка состоит из нескольких простых петлевых обмоток, помещенных в пазах якоря и соединенных между собой параллельно щетками на коллекторе (рис. 5). Эта обмотка имеет число параллельных ветвей больше, чем число полюсов в машине, и применяется в машинах с большой силой тока.
Число параллельных ветвей:

$$2a = 2pm$$

где: m – число простых петлевых обмоток, из которых получается сложно – петлевая обмотка. Опыт показывает, что эти обмотки хорошо работают только при m = 2.

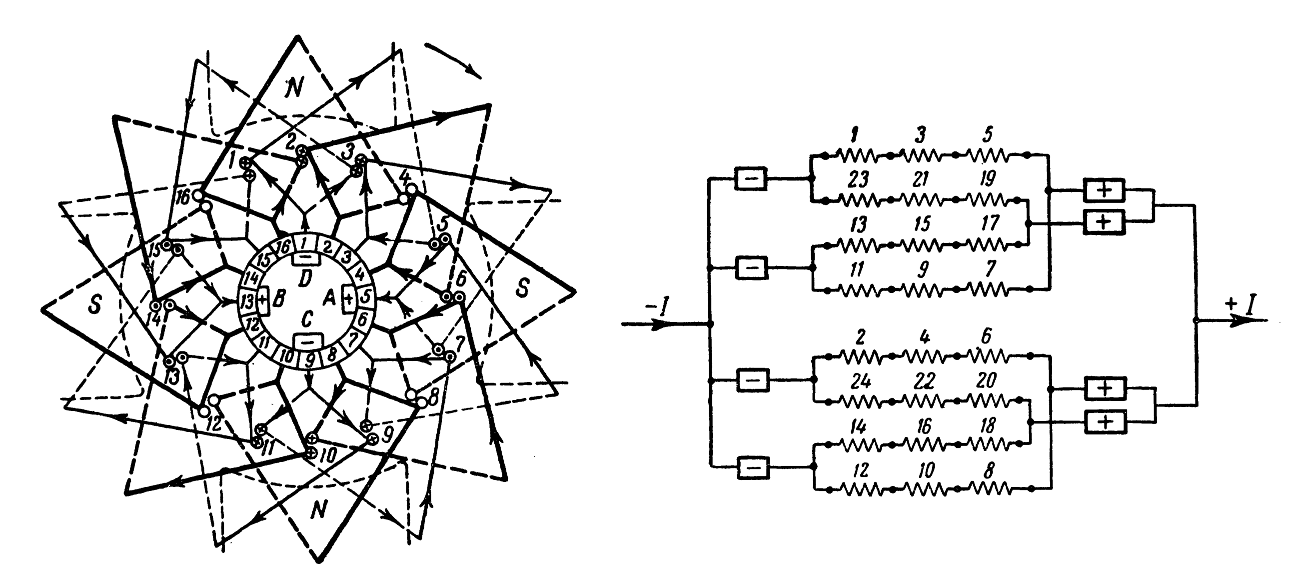


Рис. 5. Схема сложно-петлевой обмотки.

Рис. 6. Распределение секций по параллельным ветвям обмотки изображенной на рис. 5.

Шаги сложно – петлевой обмотки определяются по формулам:
результирующий шаг:

$$y = m$$

шаг по коллектору:

$$y\text{к} = \pm m$$

Так как обычно берут m = 2, то шаг обмотки по коллектору yк ± 2. Распределение секций по параллельным ветвям обмотки при z = 16 и 2p = 4 показано на рис. 6.

6. Сложно – волновая обмотка.

Сложно – волновая обмотка получается из нескольких волновых обмоток, соединенных между собой параллельно щетками на коллекторе. Число параллельных ветвей равно удвоенному числу простых волновых обмоток:

$$2a = 2m$$

где: m – число простых волновых обмоток, составляющих сложно – волновую.

Эта обмотка применяется в многополюсных машинах, у которых простая волновая обмотка приводит к недопустимо большому току в параллельной ветви, а применение петлевой обмотки создает слишком большое число параллельных ветвей. Порядок соединения проводников одного обхода сложно – волновой обмотки показан на рис. 7.

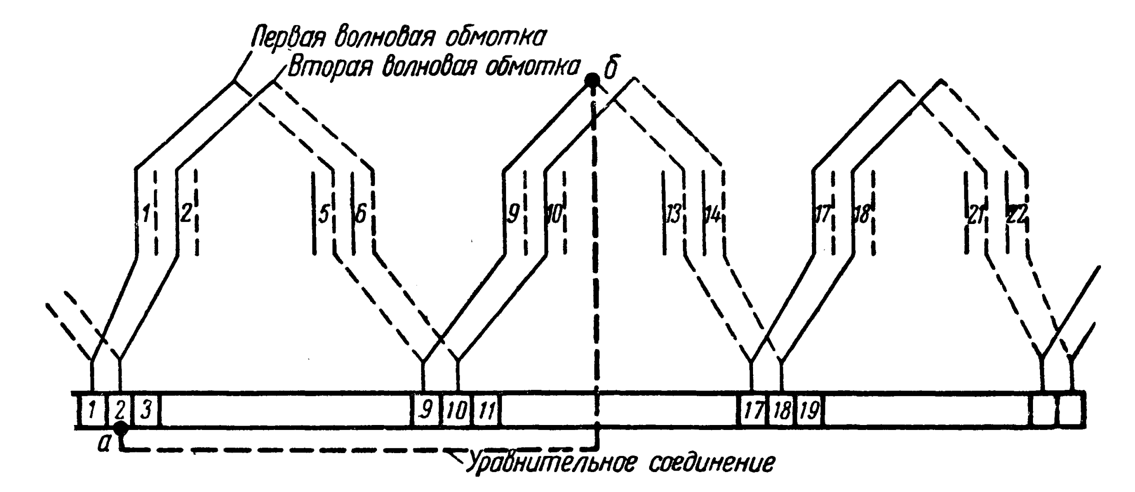


Рис. 7. Схема сложно – волновой обмотки.
$z = 26$, $2p = 6$, $k = 26$, $a = 2$.

7. Волновые обмотки с "мертвыми" секциями.

В четырехполюсных машинах при четном числе пазов или сторон секций у волновых обмоток получается дробное число для шага по коллектору, что характеризует невыполнимость обмотки. Для четырехполюсных машин выгодно применять простые волновые обмотки. Для осуществления обмотки число коллекторных пластин уменьшают на одну пластину и оставляют одну секцию свободной, не присоединенной к коллектору. Последнюю называют мертвой секцией, так как она не участвует в создании э. д. с. Данная обмотка является несимметричной. Схема волновой обмотки с мертвой секцией показана на рис. 8.

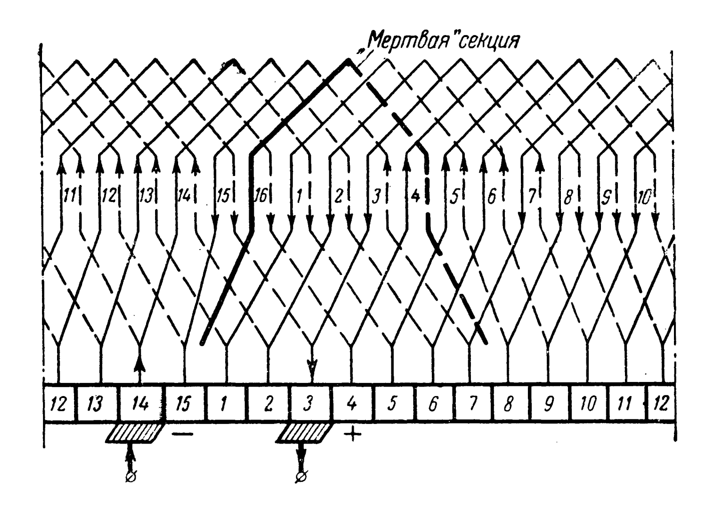


Рис. 8. Схема волновой обмотки с мертвой секцией.

8. Искусственно – замкнутая волновая обмотка.

Искусственно – замкнутая волновая обмотка применяется в том случае, когда в данном якоре при определенном числе коллекторных пластин простая волновая обмотка не осуществима. Как известно, при четном числе коллекторных пластин четырехполюсная волновая обмотка не замыкается, поэтому требуется искусственный метод намотки.

Последний заключается в том, что ведут расчет исходя из числа коллекторных пластин и пазов на единицу больше фактических, т. е. не k и z, а $k + 1$ и $z + 1$, откуда вычисляют необходимые параметры обмотки якоря.

Одну коллекторную пластину, мысленно представленную $k + 1$, и секцию, выходящую из $z + 1$ в паз второй, заменим проводником l, а провода, лежащие в нижнем слое пазов $z + 1$ и первого, сдвинем на один паз вправо. Тогда проводник нижнего слоя первого паза попадет в нижний слой второго паза, а проводник, лежащий внизу z–го паза, попадет в нижний слой первого паза. Таким сдвигом z–й паз как бы освобождается, и обмотка автоматически замыкается, т. е. получается искусственно замкнутая волновая обмотка. Так как в действительности не существует $k + 1$ пластин, то шаги по коллектору для этой обмотки будут неодинаковыми, а периодически чередоваться; один шаг:

$$ y\text{к} = \frac{(k+1)-1}{p} = \frac{k}{p} \quad \text{другой: } y'\text{к} = \frac{k}{p} - 1 $$

Чередование шагов зависит от числа полюсов машины. Так, например, в четырехполюсной обмотке один шаг равен yк, а другой y'к , а в шестиполюсной обмотке из трех шагов одного обхода 2 равны yк, а третий y'к.

Для порядка намотки желательно начинать закладывать секцию из первой коллекторной пластины, тогда при обходе обмотки по окружности якоря оставшийся свободный конец соединяют с проводником, впаянным в эту пластину.

Пусть якорь имеет (рис. 9): $z = 12$; $2p = 4$; $k = 12$; Sп = 2.

Если по расчету необходима волновая обмотка, то ведем расчет на $z + 1$ пазов и $k + 1$ коллекторных пластин. В нашем примере $k + 1 = 13$, $z + 1 = 13$, тогда шаги по коллектору выразятся:

$$ y\text{к} = \frac{(k+1)-1}{p} = \frac{12}{2} = 6 $$

$$ y_1 = 3 \text{ и } y_2 = 3 $$

шаг по пазам:

$$ y\text{п} = \frac{z}{2p} = \frac{12}{4} = 3 $$

Рис. 9. Схема искусственно – замкнутой волновой обмотки.

Секционные стороны и коллекторные пластины соединяются в таком порядке, как показано на схеме рис. 9. Так как в действительности пластина 13 и секция 13, состоящая из 13–го верхнего и 3–го нижнего проводников, не существуют, то заменим их проводником l, соединяя им нижний проводник паза 10 и коллекторную пластину 6. На цифровой схеме (рис. 10) пунктирная линия является проводником, при помощи которого происходит искусственное замыкание.

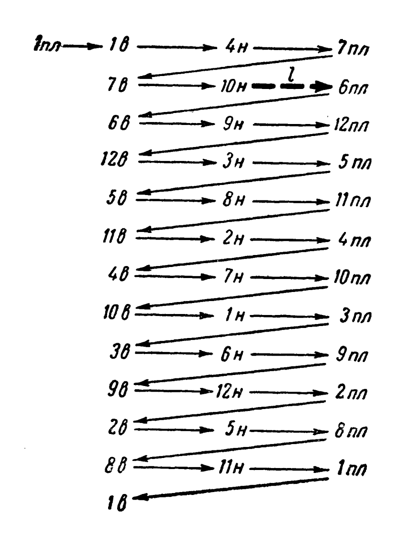


Рис. 10. Цифровая схема соединений к Рис. 9.

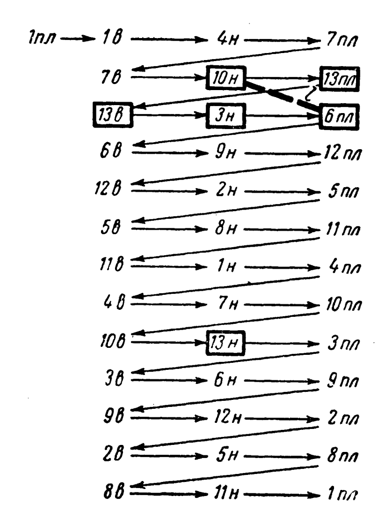


Рис 10а. Цифровая схема перехода от простой волновой при $z = k = 13$ к искусственно – замкнутой волновой обмотке при $z = k = 12$.

9. Ступенчатые обмотки.

Кроме равносекционных шаблонных обмоток, выполнимых только при целом шаге по пазам yп, можно осуществить обмотку и при дробном yп. Такая обмотка называется "ступенчатой" или "лестничной", у которой получаются неравные секции, т. е. левые стороны секций лежат в верхнем слое паза, а правые – в нижних слоях пазов (рис. 11). У "ступенчатых" обмоток для коммутации тока создаются более благоприятные условия, чем в равносекционных, поэтому эти обмотки нередко изготовляются, несмотря на дороговизну их производства и наличие уширенной коммутационной зоны, требующей соответственного уширения полюсных наконечников дополнительных полюсов.

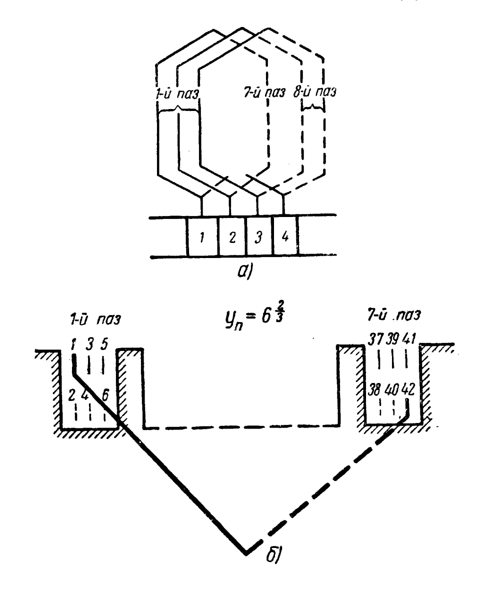


Рис. 11. Укладка в пазы секций ступенчатой обмотки.

10. Уравнительные соединения.

Уравнительные соединения – это провода, присоединенные к точкам равного потенциала на коллекторе с целью создания путей для уравнительных токов, минуя щетки. Уравнительные токи создаются от неравенства магнитных потоков отдельных полюсов машины. Неравенство магнитных потоков вызывается следующими причинами:

1) плохой сборкой машины или сработкой подшипников, что порождает неравенство воздушных зазоров под разными полюсами;
2) неоднородностью материала магнитной цепи вследствие наличия раковин в отливке станины, плохой сборки полюсов и т. д.

При нагрузке уравнительный ток складывается с током якорной цепи, увеличивая плотность тока под щеткой, что при продолжительной работе машины вызывает на коллекторе сильное искрение. Чтобы освободиться от такого нежелательного явления, необходимо направить уравнительные токи вне щеток через дополнительную электрическую цепь меньшего, сопротивления. Такой цепью будет проводник, соединяющий коллекторные пластины, находящиеся под щетками одинаковой полярности. Токи, текущие по уравнительным соединениям, создают магнитное поле, которое выравнивает потоки отдельных полюсов.

Расстояние между коллекторными пластинами, соединенными уравнительным проводом, равно расстоянию между щетками одинаковой полярности, а именно k/p. Каждое уравнительное соединение захватывает p коллекторных пластин.

а) Уравнительные соединения в петлевых обмотках.

Шаг уравнительных соединений:

$$y\text{ур} = \frac{k}{p} \text{ но так как } a = p, \text{то: } \quad y\text{ур} = \frac{k}{a}$$

Без уравнительных соединений петлевая обмотка работать хорошо не может. Одним из условий симметрии для этой обмотки является требование, чтобы k/a и z/a выражались целым числом. Для крупных машин мощностью свыше 1000 – 1200 *квт*. берут полное число уравнителей, т. е. соединяют ими все пластины коллектора, до 500 *квт*. уравнительные соединения делают через одну или через две коллекторные пластины, обычно по одному соединению на паз, а в четырехполюсных машинах малой мощности устраивают только три уравнительных соединения.

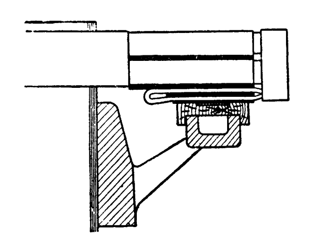


Рис. 12. Уравнительные соединения, расположенные под лобовыми частями обмотки.

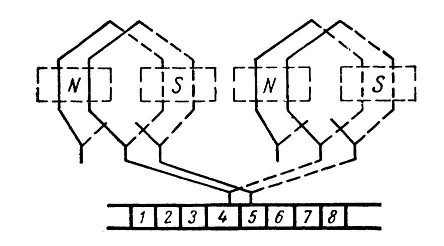


Рис. 12а. Уравнительные соединения в петушках.

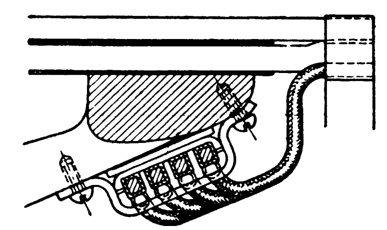


Рис. 13. Уравнительные соединения в виде колец.

Конструктивное выполнение уравнителей разнообразно. Их либо помещают под лобовыми частями обмотки (рис. 12), либо осуществляют как кольцевые провода со стороны коллектора (рис. 13). Площадь поперечного сечения уравнителей выбирают примерно 0,2 ÷ 0,5 от площади поперечного сечения проводника обмотки якоря.

б) Уравнительные соединения в волновых обмотках.

Так как параллельные ветви волновой обмотки находятся под всеми полюсами машины, то неравенство магнитных потоков отдельных полюсов не вызывает неравенства э. д. с. в параллельных ветвях обмотки. Поэтому в простых волновых обмотках нет надобности устраивать уравнительные соединения. Но в сложно – волновых обмотках уравнители необходимы, хотя здесь они имеют другое назначение.

В этих обмотках соседние коллекторные пластины принадлежат разным параллельным ветвям, и поэтому напряжения между соседними коллекторными пластинами могут быть неодинаковыми. Для выравнивания напряжений между коллекторными пластинами необходимо одну обмотку электрически соединить с другой при помощи уравнителей (уравнители 2–го рода), как показано на рис. 7. Если отношение $2p/a$ выражается нечетным числом, тогда уравнителями приходится соединять точки обмотки, расположенные с обеих сторон якоря. В этом случае шаг уравнительных соединений:

$$y\text{ур} = \frac{k}{a} - \frac{y\text{к}}{2}$$

11. Комбинированная (лягушачья) обмотка.

Лягушачья обмотка является комбинацией из волновой и петлевой обмоток, имеющих одинаковое число секций (рис. 14).

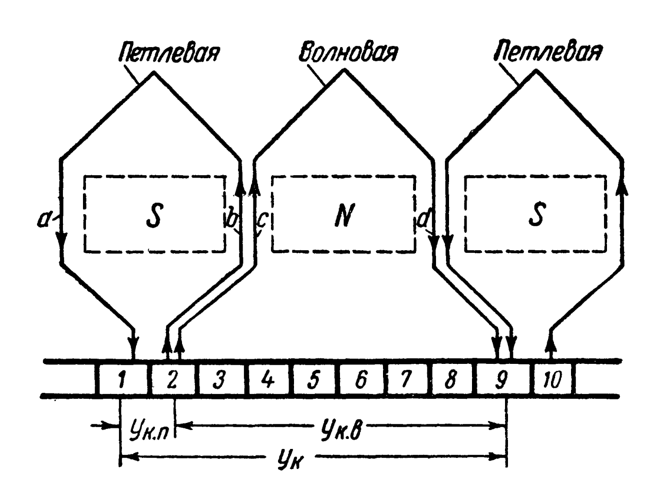


Рис. 14. Схема лягушечьей обмотки.

Эта обмотка не нуждается в уравнительных соединениях, так как секции ее играют роль уравнительных соединений. Для осуществления комбинированной обмотки в пазы якоря закладывают две обмотки: одну петлевую, а другую волновую с одним и тем же числом витков и параллельных ветвей. Число параллельных ветвей лягушечьей обмотки вдвое больше числа полюсов, так как обе обмотки соединены параллельно. Как волновую, так и петлевую обмотки необходимо присоединять к коллекторным пластинам. Поэтому к каждой коллекторной пластине присоединяется 4 проводника. Для получения пластин одного потенциала нужно, чтобы шаги по коллектору удовлетворяли следующему условию:

$$y\text{к.п} + y\text{к.в} = \frac{k}{p}$$

где: yк.п – шаг по коллектору петлевой обмотки; yк.в – шаг по коллектору волновой обмотки, тогда сумма э. д. с., индуктированных в контуре a–b–c–d будет равна нулю. Сумма шагов волновой и петлевой обмоток равна числу пазов, приходящемуся на пару полюсов:

$$y\text{к.п} + y\text{к.в} = \frac{z}{p}$$

Лягушачьи обмотки применяются в мощных или низковольтных машинах.

12. Выбор типа обмотки.

При выборе типа обмоток якоря следует руководствоваться следующими данными:
1. Число коллекторных пластин не должно быть слишком велико, так как в тонких пластинах (менее 3,5 *мм*.) нельзя сделать прорези для проводников якоря.
2. Наименьшее число коллекторных пластин должно быть таким, чтобы среднее напряжение между соседними пластинами было не более 21 *в*.
3. Сила тока в параллельной ветви якоря не должна быть больше 500 *а*, иначе возникнет искрение на коллекторе.
В практике установлены следующие области применения различных типов обмоток:
1. Простые волновые обмотки применяются для машин, мощность которых не превышает 50 *квт*. при 110 *в*, 100 *квт*. при 220 *в*, 300 *квт*. при 440 *в*.
2. Простые петлевые обмотки используются в малых двухполюсных машинах и в многополюсных машинах при мощности выше 500 *квт*.
3. Сложно – волновые обмотки применяются для машин мощностью 150 – 300 *квт*. при 220 *в*. При простой петлевой обмотке в таких машинах получается слишком большое число коллекторных пластин.
4. В машинах весьма большой мощности при больших токах применяют лягушечью обмотку.
5. Сложно – петлевые обмотки применяются для машин низкого напряжения.

13. Обмотки главных полюсов.

Обмотки главных полюсов по методу соединения с обмоткой якоря разделяются на:
1) сериесные обмотки (последовательное возбуждение).
2) шунтовые обмотки (параллельное возбуждение).
3) компаундные обмотки (смешанное возбуждение).

Обмотка возбуждения, соединяемая последовательно с обмоткой якоря, называется сериесной, а машины – сериесными.
Обмотка возбуждения, соединяемая параллельно с обмоткой якоря, называется шунтовой, а машины – шунтовыми.
Компаундная обмотка состоит из обмоток сериесной и шунтовой, а машины называются компаундными.
Сериесные обмотки имеют всегда малое количество витков с большим поперечным сечением, необходимым для прохождения полного тока якоря. Шунтовые обмотки имеют большое количество витков с малым поперечным сечением, так как эти обмотки приключаются к полному напряжению сети.

14. Обмотки дополнительных полюсов.

Обмотки дополнительных полюсов служат для компенсации поля реакции якоря в нейтральной зоне и для улучшения коммутации. Поэтому в современных электрических машинах, работающих при тяжелых условиях коммутации из–за большой реакции якоря, высокой окружной скорости и большой плотности тока в контакте под щетками, они необходимы. Без дополнительных полюсов совершенно не могут работать, например, реверсивные машины, в которых неосуществимо смещение щеток со среднего положения (нейтрали).
Так как коммутирующее поле должно изменяться при изменении нагрузки прямо пропорционально силе тока в обмотке якоря, то дополнительная обмотка должна питаться током якоря. При этом в дополнительных полюсах необходимо слабое насыщение, иначе пропорциональность между магнитной индукцией в полюсе и током в якоре нарушится.

Направление тока в обмотке дополнительных полюсов, для компенсации реакции якоря должно быть таким, чтобы ампервитки этих полюсов были направлены противоположно ампервиткам реакции якоря. Для этого обмотка дополнительных полюсов всегда присоединяется к обмотке якоря последовательно против поля реакции якоря. Чтобы улучшить коммутацию в машине, а следовательно, устранить искрение на коллекторе в двигателях без дополнительных полюсов, необходимо щетки смещать против вращения. В случае работы машины в режиме генератора щетки следует смещать на коллекторе по направлению вращения.
Для машин с дополнительными полюсами порядок чередования полярности полюсов главных (NS) и дополнительных (ns) при одном и том же направлении вращения якоря показан в табл. 3.

Таблица 3.

Режим машины	Чередование полярности полюсов главных и дополнительных	Направление вращения якоря
генератор	$N - s - S - n - N - s - S - n$	↻
двигатель	$N - n - S - s - N - n - S - s$	↻

15. Компенсационные обмотки.

Компенсационные обмотки применяются в машинах с целью уменьшения влияния поперечных ампервитков реакции якоря, которые вредно отражаются на работе машин повышая потери в стали якоря. Кроме того, из – за наличия поперечных ампервитков реакции якоря ухудшается коммутация и повышается на некоторых участках коллектора разность потенциалов между соседними пластинами. Все вышеуказанные явления в машинах уничтожаются компенсационными обмотками либо полностью, либо частично. Такие обмотки обычно закладываются во впадины полюсных наконечников и соединяются последовательно с обмоткой якоря. Компенсационные обмотки устраивают только в больших машинах или при тяжелых условиях коммутации (турбогенераторы, двигатели с ударной нагрузкой), так как они удорожают машину и усложняют ее конструкцию.

16. Составление схем обмоток якоря.

Для простоты и удобства обычно изображают схему обмотки якоря в развернутом виде на плоскости, разрезав обмотку на каком – либо участке, причем в схеме необходимо показать не только пазовые и лобовые части обмотки, но также и коллектор. Данные для составления схемы должны быть следующие:
1) тип обмотки;
2) число полюсов машины $2p$;
3) число пазов якоря z;
4) число коллекторных пластин k;
5) шаг обмотки по пазам yп (а так же частичные шаги y_1 и y_2);
6) шаг обмотки по коллектору yк.
С целью устранения появления уравнительных токов, т. е. осуществления равенства э. д. с. в параллельных ветвях обмотки якоря, необходимо создать симметричную обмотку для данного числа пазов (z) и числа коллекторных пластин (k). Условия симметрии обмотки следующие:
1. Равенство чисел проводов Nп во всех пазах якоря:

$$N\text{п} = \frac{N}{z} = \text{целому числу}$$

2. Число пазов, приходящееся на каждую пару параллельных ветвей, должно быть одинаковым:

$$\frac{z}{a} = \text{целому числу}$$

3. Число секций в каждой паре параллельных ветвей должно быть равно:

$$\frac{k}{a} = \text{целому числу}$$

4. Каждая секционная сторона, находящаяся под полюсом одной ветви, должна соответствовать секционным сторонам другой ветви одноименной полярности:

$$\frac{2p}{a} = \text{целому числу}$$

Для простой петлевой обмотки четвертое условие симметрии всегда соблюдается, так как $2a = 2p$, а остальные три условия необходимо выдержать. Для простой волновой обмотки, ввиду того что число параллельных ветвей $2a = 2$, последние три условия выполняются при любых числах пазов и коллекторных пластин и нужно выдержать только первое условие. Однако, для машин маломощных допускается отступление от первого условия в случае волновой обмотки с мертвыми секциями.

В сложно – петлевых обмотках четвертое условие симметрии выполняется только при двухкратно – замкнутой обмотке, т. е. при $2a = 4p$. Остальные три условия, безусловно, должны быть выполнены, что требует четных чисел пазов и коллекторных пластин. В сложно – волновых обмотках обычно применяется двухкратно – замкнутая обмотка ($2a = 4$), поэтому четвертое условие выполняется, остальные три условия требуют четных чисел пазов и коллекторных пластин. Для симметрии лягушечьих обмоток необходимо, чтобы числа параллельных ветвей простых петлевых и волновых обмоток были бы равны, а сумма шагов по коллектору k/p = целому числу. Что касается остальных требований симметрии, то они должны удовлетворять вышеприведенным четырем условиям.

Пример 1. Составить схему двухслойной простой петлевой обмотки для (рис. 15):

$z = 24$, $2p = 4$, Sп $= 4$ (Sп – число сторон секций в пазу)

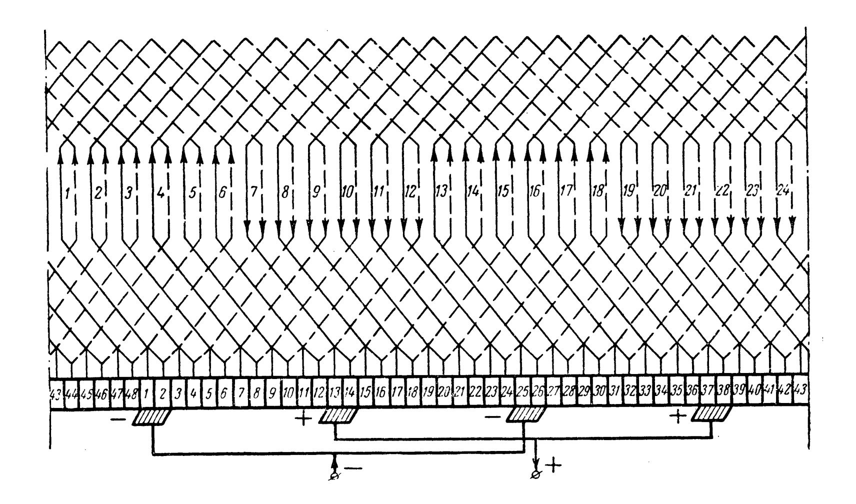


Рис. 15. Схема простой петлевой обмотки, $z = 24$, $2p = 4$, $k = 48$.

Число коллекторных пластин:

$$k = \frac{z \times S\text{п}}{2} = \frac{24 \times 4}{2} = 48$$

Шаг по коллектору:

$$yк = 1$$

Шаг по пазам:

$$yп = \frac{z}{2p} = \frac{24}{4} = 6 \quad y_1 = \frac{z \pm b}{2p} = \frac{24 \pm 0}{4} = 6 \quad y_2 = y_1 - yк = 6 - 1 = 5$$

Условия симметрии выполняются. Порядок укладки секций обмотки в пазы показан на рис. 16.

Пример 2. Составить схему двухслойной простой волновой обмотки (рис. 17) для: z = 15, $2p$ = 4, Sп = 2

Число коллекторных пластин:

$$k = \frac{z \times Sп}{2} = \frac{15 \times 2}{2} = 15$$

Шаг обмотки по коллектору:

$$yк = \frac{k - a}{p} = \frac{15 - 1}{2} = 7$$

Шаг обмотки по пазам:

$$yп = \frac{z}{2p} = \frac{15}{4} = 3\ ¾$$

берем yп = 4.

$$y = \frac{z \pm b}{p} = \frac{15 - 1}{2} = 7$$

$$y_1 = \frac{z \pm b}{2p} = \frac{15 + 1}{4} = 4$$

$$y_2 = y_1 - y_1 = 7 - 4 = 3$$

Условия симметрии выполняются. Порядок соединения секций показан на рис. 18.

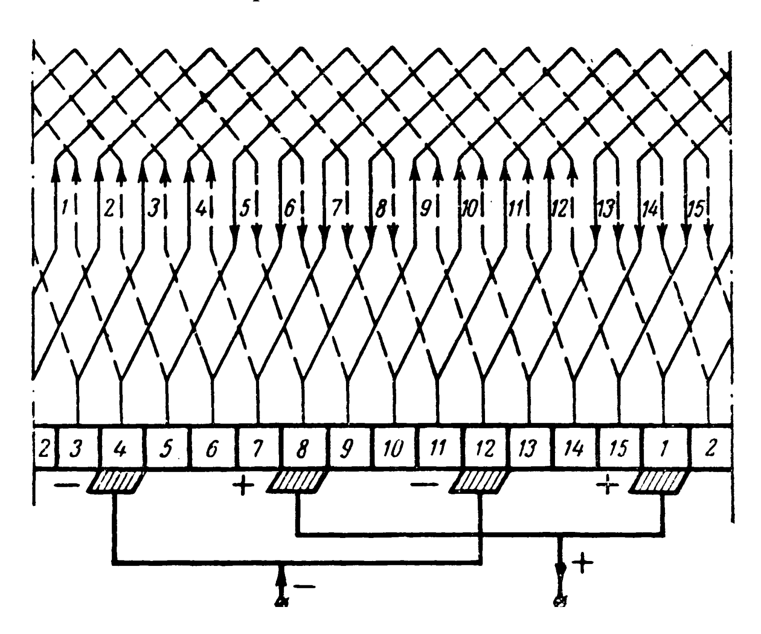


Рис. 17. Схема простой волновой обмотки
z =15, $2p$ = 4, k = 15.

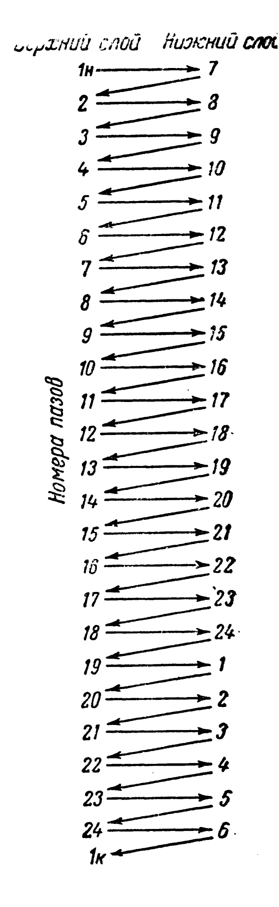


Рис. 16. Таблица соединений к схеме рис. 15.

Пример 3. Составить схему двухслойной простой волновой обмотки с мертвой секцией для $z = 22$, $2p = 4$, $S\text{п} = 2$ (рис. 19).

Число коллекторных пластин:

$$k = \frac{z \times S\text{п}}{2} - 1 = \frac{22 \times 2}{2} - 1 = 21$$

Шаг обмотки по пазам:

$$y\text{п} = \frac{z}{2p} = \frac{22}{4} = 5\ ½$$

берем $y\text{п} = 5$.

$$y = \frac{z \pm b}{p} = \frac{22 - 2}{2} = 10 \quad y_1 = \frac{z \pm b}{2p} = \frac{22 - 2}{4} = 5 \quad y_2 = y_1 - y_1 = 10 - 5 = 5$$

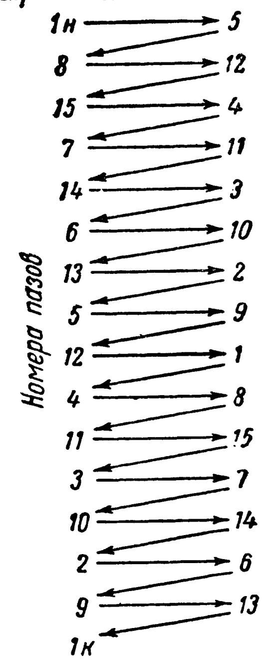


Рис. 18. Таблица соединений к схеме рис. 17.

Рис. 19. Схема волновой обмотки с мертвой секцией $z = 22$, $2p = 4$, $k = 21$.

Пример 4. Составить схему двухкратно – замкнутой сложно – петлевой обмотки для $z = 16$, $2p = 4$, $S\text{п} = 2$ (рис. 20).

Число параллельных ветвей: $2a = m \times 2p = 2 \times 4 = 8$

Число коллекторных пластин:

$$k = \frac{z \times S\text{п}}{2} = \frac{16 \times 2}{2} = 16$$

Шаг обмотки по коллектору:

$$y\text{к} = 2$$

Шаг обмотки по пазам:

$$y\text{п} = \frac{z}{2p} = \frac{16}{4} = 4$$

Частичные шаги:

$$y_1 = y\text{п} = 4 \quad y_2 = y_1 - y\text{к} = 4 - 2 = 2$$

Условия симметрии выполняются. Порядок соединения секций показан на рис. 21

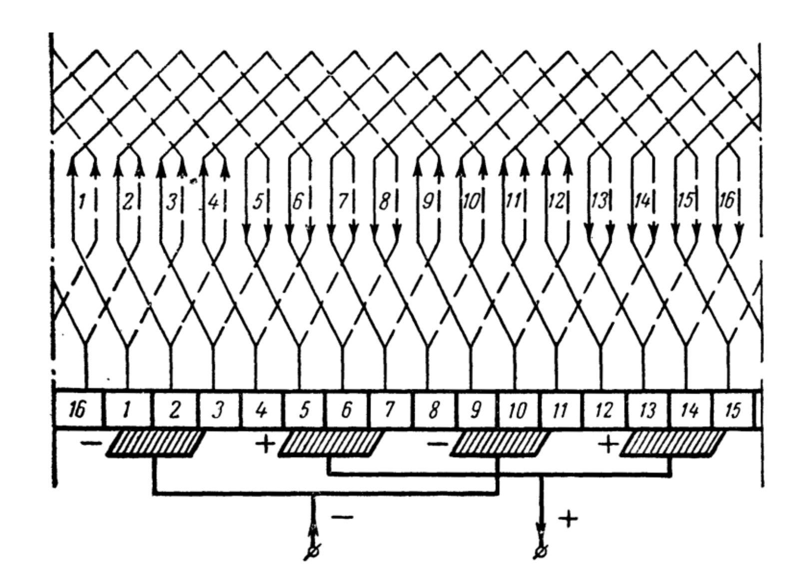


Рис. 20. Схема сложно – петлевой обмотки z =16, $2p$ = 4, k = 16, m = 2.



I обмотка (нечетные пазы)		II обмотка (четные пазы)	
Верхний слой	Нижний слой	Верхний слой	Нижний слой
1н	5	2н	6
3	7	4	8
5	9	6	10
7	11	8	12
9	13	10	14
11	15	12	16
13	1	14	2
15	3	16	4
1к		2к	

Рис. 21. Таблица соединений к схеме рис. 20.

Пример 5. Составить схему двухкратно – замкнутой сложно – волновой обмотки для z = 22, $2p$ = 4, Sп = 2 (рис. 22).

Число параллельных ветвей: $2a = 2m = 2 \times 2 = 4$

Число коллекторных пластин:

$$k = \frac{z \times S\text{п}}{2} = \frac{22 \times 2}{2} = 22$$

Шаг обмотки по коллектору:

$$y\text{к} = \frac{k \pm a}{p} = \frac{22 - 2}{2} = 10$$

Частичные шаги:

$$y_1 = 5 \text{ и } y_2 = 5$$

Шаг обмотки по пазам:

$$y\text{п} = \frac{z \pm b}{2p} = \frac{22 - 2}{4} = 5$$

Условия симметрии выполняются.

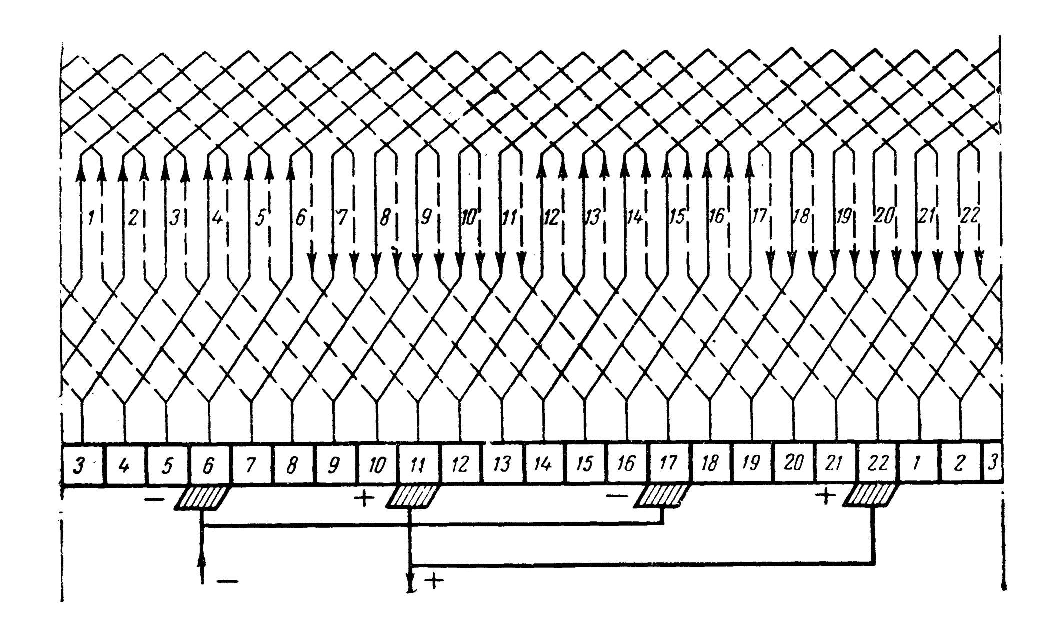


Рис. 22. Схема сложно – волновой обмотки, z = 22, 2p = 4, k = 22, m = 2.

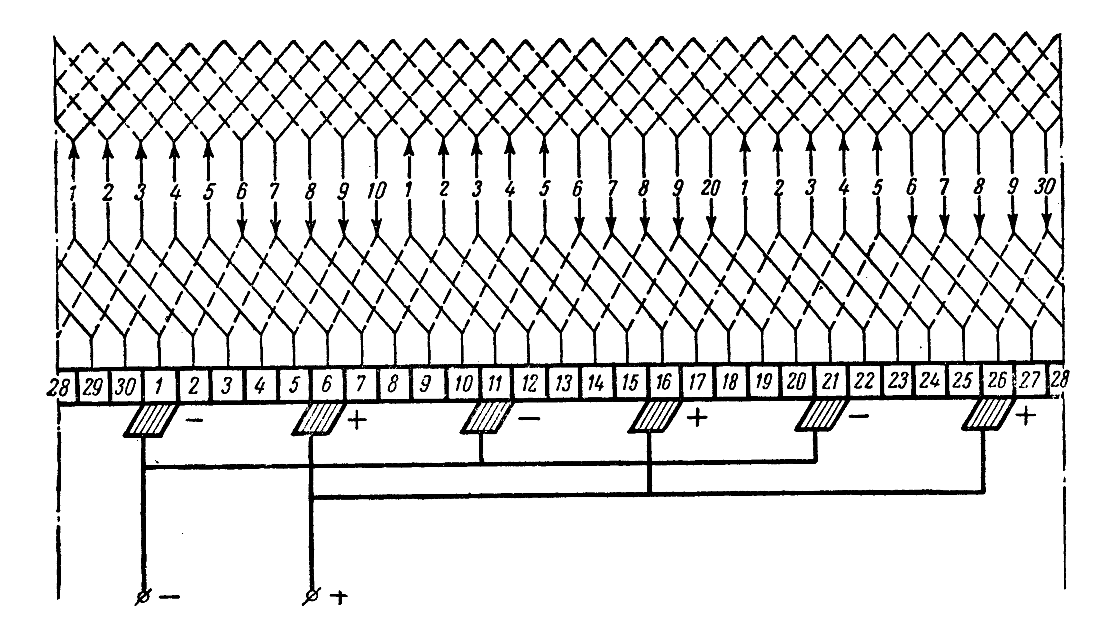


Рис. 23. Схема лягушечьей обмотки z = 30, 2p = 6, k = 30.

Пример 6. Составить схему комбинированной (лягушечьей) обмотки для:

$$z = 30,\ 2p = 6,\ S\text{п} = 2 \text{ (рис. 23).}$$

Число коллекторных пластин:

$$k = \frac{z \times S\text{п}}{2} = \frac{30 \times 2}{2} = 30$$

Шаги обмотки по коллектору при обозначениях согласно рис. 14:

$$y\text{к. п} + y\text{к. в} = \frac{k}{p} = \frac{30}{3} = 10 \quad \text{откуда: } y\text{к. п} = 1 \quad y\text{к. в} = 10 - 1 = 9$$

Шаг обмотки по пазам:

$$y\text{п. п} = \ y\text{п. в} = \frac{z}{2p} = \frac{30}{6} = 5$$

Условия симметрии выполняются.

17. Составление схем обмоток возбуждения.

Схемы обмоток возбуждения в отличие от схем обмоток якоря являются очень простыми. Особенно удобно изображать схему в развернутом виде на плоскости, где располагают катушки по порядку следования полярности. Затем указывают направление токов (согласно полярности) и делают соединения катушек по направлению токов. Число катушек возбуждения равно числу полюсов. Максимально возможное число параллельных ветвей равно числу катушек.

Пример 1. Составить схему четырехполюсной обмотки возбуждения с последовательным соединением катушек (рис. 24).

Пример 2. Составить схему четырехполюсной обмотки возбуждения, соединив катушки полюсов в 2 параллельные группы (рис. 25).

Пример 3. Составить схему четырехполюсной обмотки возбуждения, катушки которой между собой соединены в четыре параллельные группы (рис. 26).

Пример 4. Составить схему обмотки возбуждения для четырехполюсной машины с дополнительными полюсами: а) для генератора (рис. 27); б) для электродвигателя (рис. 28) при одинаковом направлении вращения якоря.

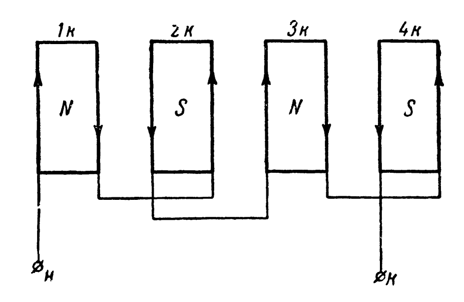


Рис. 24. Схема четырехполюсной обмотки возбуждения с последовательным соединением катушек.

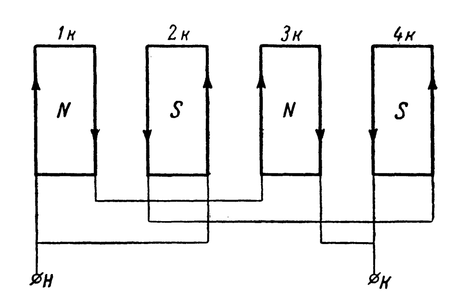


Рис. 25. Схема четырехполюсной обмотки возбуждения с соединением катушек в две параллельные группы.

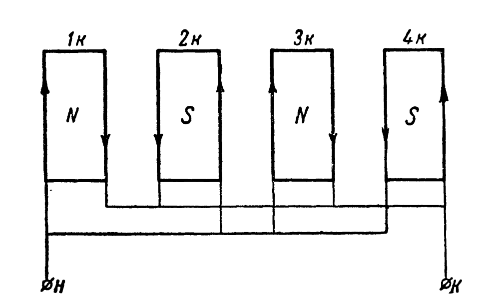


Рис. 26. Схема четырехполюсной обмотки возбуждения с соединением катушек в 4 параллельные группы.

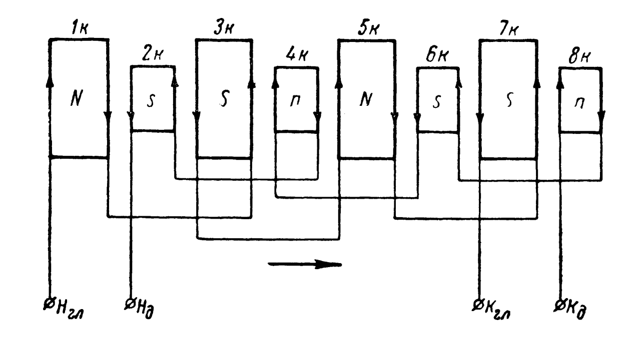


Рис. 27. Схема четырехполюсной обмотки возбуждения генератора с дополнительными полюсами.

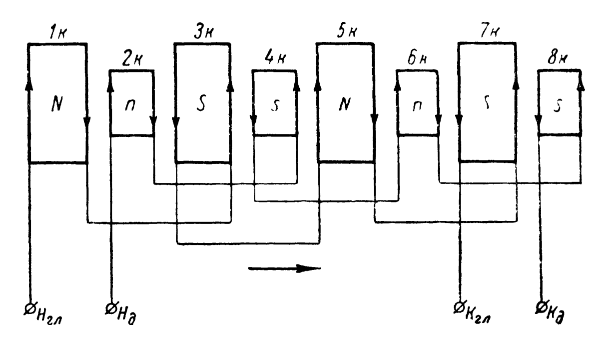


Рис. 28. Схема четырехполюсной обмотки возбуждения электродвигателя с дополнительными полюсами.

Глава вторая.
Пересчет электрических машин постоянного тока.
18. Основные электромагнитные нагрузки машины.

На электроремонтных заводах или в мастерских нередко приходится изменять у электрических машин основные данные паспорта (напряжение, число оборотов). При пересчетах машин необходимо учитывать ряд факторов. Например, переход машины на повышенное напряжение приводит к худшему коэффициенту заполнения паза и уменьшению мощности.
При пересчете на повышенное напряжение необходимо учитывать, чтобы среднее напряжение между двумя соседними пластинами коллектора не превосходило 21 *в*, иначе ухудшится коммутация и машина будет "искрить". При пересчете на пониженное напряжение надо проверить коллектор на нагрев.
Если машина, присланная в ремонт не имеет паспорта и обмоточных данных или даже имеет паспорт, но без обмоточных данных, или наконец, имеет обмоточные данные, но без паспорта, то в этих случаях требуется полный пересчет с целью определения обмоточных или номинальных данных машины.
При пересчетах машин постоянного тока, имеющих заводскую обмотку, на другие технические данные (например, с одного напряжения на другое или с одного числа оборотов на другое), магнитный поток должен остаться неизменным. При расчете следует подбирать поток таким, чтобы магнитная индукция в зубцах, спинке якоря или станины не была чрезмерной. Кроме того, для электродвигателей необходимо учитывать крутящий момент.

После перемотки машины постоянного тока необходимо проверить ее на:
1) прочность изоляции;
2) перегрев;
3) механическую прочность (особенно бандажи).

При пересчете на большее число оборотов увеличиваются механические напряжения в бандажах, коллекторе, обмоткодержателях, клиньях, так как эти детали подвергаются действию центробежных сил.
Перегрев обмотки должен остаться прежним, если потери в меди, пропорциональные $I^2 \times r$, будут не больше, чем в машине до перемотки, поэтому сопротивление обмотки должно изменяться обратно пропорционально квадрату силы тока. Что касается класса изоляции, то необходимо его выполнять согласно нормам ГОСТ 183-41.
Дадим определения основным электромагнитным нагрузкам (плотность тока, линейная нагрузка и магнитная индукция).
Плотностью тока называется отношение силы тока к площади поперечного сечения проводника (Δ *а/мм*^{2}):

$$\Delta = \frac{I}{s\text{м}}$$

где: I – сила тока, a, sм – площадь поперечного сечения проводника, *мм*^{2}.
Линейной нагрузкой называется число ампернроводов обмотки якоря, приходящееся на погонный сантиметр длины наружной окружности якоря (AS *а/см.*):

$$AS = \frac{ia \times N}{\pi \times Da}$$

где: ia – сила тока в параллельной цепи, a (для машин постоянного тока $ia = Ia/2a$, Ia – сила тока в якоре), N – число эффективных проводов обмотки якоря: $N = N\text{п} \times z$, Da – внешний диаметр якоря, *см*.

Магнитной индукцией или плотностью магнитного потока называется отношение магнитного потока к площади поперечного сечения магнитопровода:

$$B = \frac{\Phi}{s} \quad \text{гс}$$

где: Φ – магнитный поток, *мкс.*, s – площадь поперечного сечения магнитопровода, *см*^{2}.

Магнитным потоком называется число силовых линий, проходящих через площадь поперечного сечения магнитопровода.

Необходимо задаваться оптимальными электромагнитными нагрузками, чтобы был нормальный перегрев системы и мощность соответствовала паспортным данным. Нормальный перегрев в обмотках возбуждения и якоря, а также в активной стали по сравнению с температурой окружающей среды установлен ГОСТ 183-41.

В машинах постоянного тока, когда еще не знали о дополнительных полюсах, для получения хороших условий коммутации, допускали малые линейные нагрузки в якоре и малые плотности тока в обмотке, но относительно большие магнитные насыщения и большую величину индукции в воздушном зазоре. Эти машины получались с большими габаритами и поэтому были тяжеловесными.

В настоящее время строят машины постоянного тока с большой линейной нагрузкой в якоре, высокой плотностью тока и с умеренной величиной магнитной индукции в воздушном зазоре, что создает экономию активного материала и компактность конструкции.

Выбрав или подсчитав линейную нагрузку и плотность тока в обмотке якоря, можно проверить двигатель на нагрев обмотки.

Нагрев обмотки характеризуется произведением линейной нагрузки на плотность тока ($AS \times \Delta a$) так как он прямо пропорционален плотности тока и линейной нагрузке.

Перегрев $\Delta t° = AS \times \Delta a \leq 1000 \div 1800$

Меньшие значения относятся к закрытым машинам, а бóльшие к вентилируемым.

Рекомендуемые плотности тока в обмотках машин постоянного тока приведены в табл. 4, а линейные нагрузки якоря – в табл. 5.

Таблица 4.

Допустимые плотности тока в обмотках машин постоянного тока при перегревах 65°С.

Исполнение машины	в обмотке якоря *а/мм*^{2}	в обмотке доп. полюсов. *а/мм*^{2}	в шунтовой обмотке возбуждения *а/мм*^{2}
Машины мощностью до 200 *квт.* при числе оборотов от 500 до 2000 *об. мин.* с вентилятором на валу.	3 ÷ 6	2 ÷ 4	1,8 ÷ 4
Машины открытого типа без вентилятора на валу мощностью до 1000 *квт.* при числе оборотов от 200 до 1000 *об. мин.*	3 ÷ 5	1,5 ÷ 3	1,8 ÷ 3
Тихоходные машины открытого типа мощностью до 500 *квт.* при числе оборотов до 200 *об. мин.*	3 ÷ 4,5	1,2 ÷ 2,5	1,2 ÷ 2,5

Таблица 5. Допустимые линейные нагрузки и индукции в воздушном зазоре машин постоянного тока.

Da, см.	6	8	10	15	20	30	50	60	80	100
AS, а/см.	65	85	125	200	260	325	375	380	400	420
Bl, гс	3500	3800	4300	5200	6300	7700	9000	9400	9800	10000

Приведенные в таблице 5 значения *AS* соответствуют окружным скоростям не ниже 15 *м/сек.*, при более низких скоростях во избежание перегрева обмотки якоря необходимо выбирать значения *AS* меньшими.
Магнитная индукция в воздушном зазоре машин постоянного тока находится в пределах:

$$Bl = 3500 \div 10000\ гс$$

допускаемая магнитная индукция в спинке якоря машин постоянного тока:

$$Ba = 5000 \div 16000\ гс \text{ (табл. 9а)}$$

магнитная индукция в спинке станины:

$$Bj = 5000 \div 15000\ гс$$

магнитная индукция в полюсе для машин без дополнительных полюсов:

$$Bm = 6000 \div 17000\ гс$$

Для машин с дополнительными полюсами индукцию в спинке рекомендуется уменьшить на 10 ÷ 20% во избежание чрезмерных насыщений.
Магнитная индукция в зубцах якоря:

$$Bzмакс = 19000 \div 23000\ гс$$

При выборе магнитной индукции необходимо учитывать материал магнитопровода (табл. 6).

Таблица 6. Таблица допустимых индукций в сердечниках полюса и спинке станины.

Материал	*Bm, гс*	*Bj, гс*
Электротехническая сталь	15000 ÷ 17000	12000 ÷ 15000
Стальное литье	15000 ÷ 17000	11000 ÷ 14000
Чугун	6000 ÷ 8000	5000 ÷ 8000

Необходимо также плотность тока в обмотках асинхронных двигателей и в обмотке якоря постоянного тока выбирать, исходя из величины силы тока (табл. 7), так как с увеличением сечения проводника ухудшаются условия охлаждения и возникают дополнительные потери в проводниках большого сечения.

Таблица 7.

ja, а	Асинхронные двигатели Δ, $а/мм^2$	Машины постоянного тока Δa, $а/мм^2$
3 ÷ 6	8 ÷ 6	6 ÷ 5
6 ÷ 15	6 ÷ 5,5	5 ÷ 4,5
15 ÷ 70	5,5 ÷ 5,0	3,4÷ 4,5
70 ÷ 180	5,0 ÷ 4,5	3 ÷ 3,4
180 ÷ 240	4,5 ÷ 4,0	2,0 ÷ 3,0

Где: *ja* – ток в параллельной ветви или параллельном проводе якоря или асинхронного двигателя; Δ – плотность тока в обмотках статора и ротора; Δ*a* – плотность тока в обмотке якоря.

Для уменьшения искрения на коллекторе требуется выполнение следующих условий:
1. Линейную нагрузку выбирать небольшой.
2. Плотностью тока под щетками задается в пределах допускаемых, исходя из марки щеток:
а) твердоугольные щетки Δщ ≤ 5 ÷ 7 $а/см^2$
б) графитовые Δщ ≤ 9 ÷ 12 $а/см^2$
в) электрографитовые Δщ ≤ 8 ÷ 10 $а/см^2$
г) медно-графитовые Δщ ≤ 25 ÷ 30 $а/см^2$

3. Число витков в секционной группе в пазу обмотки якоря выбирать небольшим.
4. Нельзя перематывать на повышенное число оборотов машину, склонную к искрению.
5. Среднее напряжение между соседними коллекторными пластинами следует допускать *Uср* = 11 ÷ 21 *в* во избежание сильного искрения.

19. Электродвижущая сила машины и магнитный поток.

Для электрического расчета машин применим основную формулу, которая определяет связь между числом оборотов, напряжением или э. д. с., числом проводников обмотки якоря и магнитным потоком:

$$\Phi = \frac{E \times 60 \times a \times 10^8}{n \times N \times p}$$

где: *n* – число оборотов якоря в минуту; *N* – число проводников обмотки якоря; *p* – число пар полюсов машины; *Ф* – магнитный поток одного полюса, *мкс.*; *a* – число пар параллельных ветвей обмотки якоря; *Е* – э. д. с. машины при нагрузке, *в*.

$$E = U \pm Ia \times \Sigma r \pm \Delta E$$

U – номинальное напряжение на зажимах машины, *в*. Δ*E*–падение напряжения на коллекторе, *в*. *Ia* – ток в обмотке якоря, *а*:

$$Ia = I \pm I\text{ш}$$

где: *I* – номинальная сила тока машины; *I*ш – сила тока в шунте.
Знак **+** берется для генератора, знак **–** для двигателя.
Номинальный ток определится по формулам, для генератора:

$$I = \frac{P \times 1000}{U}$$

где: *P* – номинальная мощность, *квт*.
для двигателя:

$$I = \frac{P \times 1000}{U \times \eta}$$

где: *η* – к. п. д. двигателя выбирается по табл. 8.

Суммарное сопротивление в горячем состоянии найдем:

$$\Sigma r = r\text{а} + r\text{с} + r\text{д}$$

где: *r*а – сопротивление обмотки якоря, *ом*, *r*с – сопротивление сериесной обмотки, *ом*, *r*д – сопротивление обмотки дополнительных полюсов, *ом*.

Таблица 8. Коэффициент полезного действия нормальных машин постоянного тока в зависимости от номинальной мощности.

Номинальная мощность P, *квт.*	η = к. п. д. при числе оборотов в минуту, n			
	3000	1500	1000 – 600	125
1,0	0,77	0,725	0,72	–
1,5	0,78	0,75	0,735	–
2,0	0,795	0,755	0,745	0,75
3,0	0,81	0,773	0,76	0,755
4,0	0,82	0,779	0,77	0,76
5,0	0,825	0,805	0,8	0,77
7,0	0,835	0,82	0,81	0,8
10	0,85	0,83	0,825	0,81
15	0,86	0,845	0,835	0,825
20	0,87	0,855	0,85	0,835
30	0,88	0,87	0,865	0,845
50	–	0,88	0,875	0,86
70	–	0,89	0,887	0,87
100	–	0,895	0,89	0,88
150	–	0,905	0,90	0,89
200	–	0,91	0,905	0,894
300	–	–	0,91	0,902
500	–	–	0,92	0,91
700	–	–	0,924	0,916
1000	–	–	0,93	0,923

20. Пересчет обмотки якоря на другое напряжение.

Из приведенной в §19 формулы зависимости магнитного потока видно, что поток прямо пропорционален э. д. с. и обратно пропорционален числу проводников в обмотке якоря и числу оборотов. При пересчете на другое напряжение необходимо оставить прежними мощность и магнитный поток, а число проводников якоря необходимо увеличить или уменьшить во столько раз, во сколько увеличивается или уменьшается э. д. с.
Итак, при выборе новой обмотки якоря основной формулой служит:

$$E = \frac{p}{a} \times \frac{n}{60} \times N \times \Phi \times 10^{-8} \text{ в}$$

Обозначим данные обмотки до перемотки через (ст - старое):

$$E\text{ст}, n\text{ст}, N\text{ст}, a\text{ст}, P\text{ст}$$

а после перемотки соответственно (нов - новое):

$$E\text{нов}, n\textit{нов}, N\text{нов}, a\textit{нов}, P\text{нов}$$

Подставим в основную формулу э. д. с.:

$$E\text{ст} = \frac{p\text{ст} \times n\text{ст}}{60} \times \frac{N\text{ст}}{a\text{ст}} \times \Phi \times 10^{-8} \text{ в}$$

$$E\text{нов} = \frac{p\text{нов} \times n\text{нов}}{60} \times \frac{N\text{нов}}{a\text{нов}} \times \Phi \times 10^{-8} \text{ в}$$

Разделив Eнов на Eст при сохранении числа полюсов Pнов = Pст, получим:

$$\frac{E\text{нов}}{E\text{ст}} = \frac{n\text{нов} \times N\text{нов} \times a\text{ст}}{n\text{ст} \times N\text{ст} \times a\text{нов}}$$

откуда получим окончательную формулу:

$$N\text{нов} = N\text{ст} \times \frac{E\text{нов} \times n\text{ст} \times a\text{нов}}{E\text{ст} \times n\text{нов} \times a\text{ст}}$$

Эта формула является основной для определения числа проводников обмотки якоря при перемотке. Если пересчет на другое напряжение делается при сохранении числа оборотов якоря, т. е nнов = nст формула примет вид:

$$N\text{нов} = N\text{ст} \times \frac{E\text{нов} \times a\text{нов}}{E\text{ст} \times a\text{ст}}$$

Если мы желаем сохранить число параллельных ветвей, то формула примет еще более простой вид:

$$N\text{нов} = N\text{ст} \times \frac{E\text{нов}}{E\text{ст}} \quad \text{и} \quad N\text{нов} \approx N\text{ст} \times \frac{U\text{нов}}{U\text{ст}}$$

При изменении числа проводников обмотки якоря приходится считаться с тем, чтобы сохранить имеющийся коллектор с заданным числом коллекторных пластин. Поэтому при перемотке на другое напряжение число сторон секций в пазу сохраняется прежним, а изменяется число витков секции.

Зависимость между числом витков секции и числом эффективных проводников в пазу Nп определяется следующей формулой:

$$N\text{п} = W\text{п} \times S\text{п}$$

где Sп– число сторон секций обмотки в пазу; Wп– число витков в стороне секций.

В двухслойной обмотке в каждом пазу лежат две секции. На рис. 29 дан разрез паза якоря со следующими обмоточными данными: Nп= 24, Wп = 4, Sп = 6.

Если требуется перемотать якорь с 220 *в* на 110 *в* той же обмоточной медью, то, уменьшив вдвое число витков секции Wп и соединив по два проводника параллельно, мы тем самым вдвое уменьшим число эффективных проводников и вдвое увеличим сечение, сохранив число коллекторных пластин. При замене старой обмотки, найдя эффективное число проводов в пазу якоря, необходимо подобрать поперечное сечение проводника, чтобы обмотка уместилась в пазу и не перегревалась от чрезмерной плотности тока. Так как мощность должна остаться постоянной, то с изменением напряжения, безусловно, сила тока в обмотке якоря получит другое значение:

$$Ia.\text{нов} = Ia.\text{ст} \times \frac{U\text{ст}}{U\text{нов}}$$

$$s\text{м. нов} = s\text{м. ст} \times \frac{N\text{п. ст}}{N\text{п. нов}}$$

где: Ia – ток в обмотке якоря, *а*, U – напряжение на зажимах машины, *в*; sм – площадь поперечного сечения проводника обмотки якоря, *мм*^{2}.

Пример 1. При неизменной мощности машины требуется пересчитать волновую обмотку якоря, имеющую число проводов в пазу якоря Nп = 24, диаметр провода d = 1,56 *мм*. при токе якоря Ia = 15,5 *а*, с напряжения 115 *в* на напряжение 230 *в*, если Y нельзя пересоединить. Находим ток в якоре при новом напряжении:

$$Ia.\text{нов} = Ia.\text{ст} \times \frac{U\text{ст}}{U\text{нов}} = 15{,}5 \times \frac{115}{230} = 7{,}75\ a$$

число проводов в пазу:

$$N\text{нов} = N\text{ст} \times \frac{U\text{нов}}{U\text{ст}} = 24 \times \frac{230}{115} = 48$$

Поперечное сечение провода:

$$s\text{м.ст} = 0{,}785 \times d^2 = 0{,}785 \times 1{,}56^2 = 1{,}92\ \text{мм}^2$$

Поперечное сечение новой обмотки:

$$s\text{м.нов} = s\text{м.ст} \times \frac{N\text{п.ст}}{N\text{п.нов}} = 1{,}92 \times \frac{24}{48} = 0{,}96\ \text{мм}^2$$

что соответствует по стандарту на обмоточную медь ∅ 1,08 *мм*. (сечение 0,92 $мм^2$).
Плотность тока в обмотке якоря:

$$\Delta a = \frac{Ia}{2a \times s\text{м.нов}} = \frac{7{,}75}{2 \times 0{,}92} = 4{,}2\quad \text{а/мм}^2 \quad \text{а}\ \Delta a.\text{ст} = 4{,}04 \quad \text{а/мм}^2$$

т. е. плотность тока примерно сохранилась.
Затем рекомендуется проверить напряжение между двумя соседними коллекторными пластинами. Если среднее напряжение после перемотки на большее напряжение оказалось в пределах 11 ÷ 21 *в*, то коллектор машины оставляем прежним:

$$U\text{ср} = \frac{U\text{нов} \times 2p}{k} \leq 11 \div 21\ \text{в}$$

При перемотке якоря на низшее напряжение необходимо вследствие увеличения силы тока в обмотке якоря проверить плотность тока под щеткой. Если окажется, что плотность тока для данного сорта щеток чрезмерно высока, то следует увеличить площадь щеток. Плотность тока под щеткой определится:

$$\Delta\text{щ} = \frac{I\text{щ}}{n\text{щ} \times s\text{щ}}$$

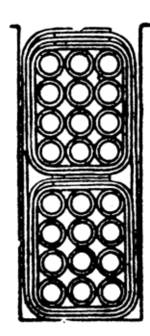


Рис. 29. Разрез паза якоря.

где: Δщ – плотность тока в контакте, $а/см^2$; Iщ – ток в щеточном болте, *а*; nщ– число щеток на щеточном болте; sщ – сечение щетки, $см^2$; bщ – ширина щетки, *см*.; выбирается в пределах от 2 до 3 коллекторных делений; lщ – длина щетки, *см*. Ток в щеточном болте:

$$I\text{щ} = \frac{2 \times Ia}{2p} = \frac{Ia}{p}$$

При перемотке желательно сохранить старое число параллельных ветвей, т. е. оставить прежний тип обмотки, так как не всегда возможно выполнить другую симметричную обмотку при том же числе пазов и коллекторных пластин. Изменить число параллельных ветвей выгодно в тех случаях, когда удается сделать пересоединение обмотки с волновой на петлевую или наоборот, не перематывая якоря.

21. Пересчет обмоток полюсов на другое напряжение.

В машинах постоянного тока с самовозбуждением при изменении напряжения на якоре соответственно изменится и напряжение возбуждения. Следовательно, если необходимо пересчитать машину на другое напряжение, а пересоединить обмотку возбуждения не удается, то эта обмотка должна быть перемотана по новым данным.
При пересчетах обмоток возбуждения на другое напряжение необходимо сохранить неизменный магнитный поток машины.
Для выяснения размеров катушки возбуждения надо знать суммарное число ампервитков машины (ΣAW), потребное для проведения магнитного потока возбуждения (Φm) через всю магнитную цепь. Может случиться, что выполненная машина не даст того напряжения, которое было предложено при расчете, а двигатель не разовьет требуемых оборотов. Например, в случае не предвиденного при расчете наличия внутри литой станины или полюсов раковин. Поэтому рекомендуется брать ампервитки обмотки возбуждения с запасом на 10÷20%.

а) Пересчет обмотки параллельного возбуждения (шунтовой).

Пересчет шунтовой обмотки на другое напряжение делается из условия постоянства ампервитков. Пусть:

Wш – число витков шунтовой обмотки на полюс.
sш – площадь поперечного сечения проводника обмотки, *мм*^{2}.
lш – средняя длина витка шунтовой обмотки, *м*.
Iш – ток в шунтовой обмотке, *а*.
Iш × Wш – ампервитки шунтовой обмотки.
rш – сопротивление шунтовой обмотки в горячем состоянии.
U – напряжение на зажимах машины, *в*.
Сила тока в шунтовой обмотке:

$$I\text{ш} = \frac{U}{r\text{ш}}$$

Число витков на полюсе:

$$W\text{ш} = \frac{\Sigma AW}{2p \times I\text{ш}}$$

Сопротивление в горячем состоянии:

$$r\text{ш} = \frac{2p \times 1{,}26 \times W\text{ш} \times l\text{ш}}{57 \times s\text{ш}}$$

Средняя длина витка обмотки при пересчете на другое напряжение примерно остается постоянной, следовательно, ампервитки шунтовой обмотки пропорциональны напряжению и площади поперечного сечения проводника. Произведение U × sш после перемотки должно быть таким как до перемотки.
Обозначим:

Uст, sш.ст, Wш.ст – до перемотки
Uнов, sш.нов, Wш.нов – после перемотки

Согласно условию:

$$U\text{ст} \times\ s\text{ш. ст} =\ U\text{нов} \times\ s\text{ш. нов}$$

или

$$\frac{U\text{ст}}{W\text{ш. ст}} = \frac{U\text{нов}}{W\text{ш. нов}}, \qquad \text{откуда: } s\text{ш. нов} = s\text{ш. ст} \times \frac{U\text{ст}}{U\text{нов}}$$

$$W\text{ш. нов} = W\text{ш. ст} \times \frac{s\text{ш. ст}}{s\text{ш. нов}} \quad \text{или} \quad W\text{ш. нов} = W\text{ш. ст} \times \frac{U\text{нов}}{U\text{ст}}$$

б) Пересчет обмотки последовательного возбуждения (сериесной).

Для этой обмотки при пересчете на другое напряжение необходимо сохранить число ампервитков прежним, так как магнитный поток машины должен сохраниться. Поэтому произведение силы тока на число витков должно быть величиной постоянной.
Обозначим Wс – число витков сериесной обмотки, sc – сечение проводников сериесной обмотки. Тогда:

$$Ia.\text{ст} \times W\text{с}.\text{ст} = Ia.\text{нов} \times Wc.\text{нов}$$

или

$$W\text{с}.\text{нов} = W\text{с}.\text{ст} \times \frac{Ia.\text{ст}}{Ia.\text{нов}}$$

Число витков на полюсе обмотки последовательного возбуждения определяется отношением суммарных ампервитков машины к току якоря:

$$W\text{с} = \frac{\Sigma AW}{2p \times Ia}$$

Площадь поперечного сечения проводов изменяется обратно пропорционально числу витков. Из постоянства объема обмотки на полюсе следует, что:

$$W\text{с}.\text{ст} \times s\text{с}.\text{ст} = W\text{с}.\text{нов} \times s\text{с}.\text{нов}, \qquad \text{откуда: } s\text{с}.\text{нов} = s\text{с}.\text{ст} \times \frac{W\text{с}.\text{ст}}{W\text{с}.\text{нов}}$$

При изменении числа витков в якоре прямо пропорционально меняется и число витков главных полюсов.

Пусть имеем на главном полюсе число витков Wс по которым проходит ток якоря Ia тогда число ампервитков главных полюсов найдется по формуле:

$$\Sigma AW = AW\text{с} = 2p \times W\text{с} \times Ia$$

Число витков обмотки якоря $Wa = N/2$, по которым проходит ток параллельной ветви $Ia/2$, тогда число ампервитков якоря:

$$AWa = \frac{N}{2} \times \frac{Ia}{2a} = \frac{Ia \times N}{4a}$$

Возьмем отношение:

$$\frac{AW\text{с}}{AWa} = \frac{2p \times W\text{с} \times Ia}{\frac{Ia \times N}{4a}} = \frac{8p \times aW\text{с}}{N}$$

Эта формула действительна при условии последовательного соединения главных полюсов между собой, а при соединении в параллель – ток в параллельной ветви обмотки главных полюсов выразится: Ia/ac, где ac – число параллельных ветвей обмотки главных полюсов, тогда:

$$AW\text{с} = 2p \times W\text{с} \times \frac{Ia}{ac}$$

откуда получаем отношение:

$$\frac{AW\text{с}}{AWa} = \frac{8p \times a \times W\text{с}}{N \times ac}$$

Обозначим данные машины:

Nст, aст, Wс. ст, aс. ст – до перемотки
Nнов, aнов, Wс. нов, aс. нов – после перемотки

отсюда:

$$\frac{AW\text{с}}{AWa} = \frac{8p \times a\text{ст} \times W\text{с. ст}}{N\text{ст} \times a\text{с. ст}} = \frac{8p \times a\text{нов} \times W\text{с. нов}}{N\text{нов} \times a\text{с. нов}}$$

Следовательно новое число витков главных полюсов сериесной обмотки:

$$W\text{с. нов} = W\text{с. ст} \times \frac{N\text{нов} \times a\text{ст} \times a\text{с. нов}}{N\text{ст} \times a\text{нов} \times a\text{с. ст}}$$

новое сечение обмотки:

$$s\text{с. нов} = s\text{с. нов} \times \frac{N\text{ст} \times a\text{нов} \times a\text{с. ст}}{N\text{нов} \times a\text{ст} \times a\text{с. нов}}$$

в) Пересчет обмотки смешанного возбуждения (компаундной).

Поток в компаундной машине создается суммой ампервитков шунтовой и сериесной обмоток и остается постоянным даже при значительном изменении нагрузки. Ампервитки сериесной обмотки, изменяющиеся при нагрузке, поддерживают постоянное напряжение на зажимах компаундной машины.
Итак,

$$AW\text{к} = AW\text{ш} + AW\text{с} \ \text{ откуда: } W\text{с} = \frac{AW\text{к} - AW\text{ш}}{Ia}$$

где: Ia – ток, протекающий по сериесной обмотке, *а*,

$$W\text{ш} = \frac{AW\text{ш}}{I\text{ш}} \quad \text{где: } I\text{ш} = \Delta\text{ш} \times s\text{ш}, s\text{с} = \frac{Ia}{\Delta s} \quad \text{мм}^2$$

Δш и Δs – плотности токов в обмотках возбуждения, *а/мм*^{2}.

При изменении напряжения число ампервитков компаундной обмотки должно быть постоянным, для чего пересчитываются на новые данные и шунтовая и сериесная обмотки.
Для шунтовой обмотки:

$$W\text{ш. нов} = W\text{ш. ст} \times \frac{U\text{нов}}{U\text{ст}} \quad \text{и} \quad s\text{ш. нов} = s\text{ш. ст} \times \frac{W\text{ш. ст}}{W\text{ш. нов}}$$

Для сериесной обмотки:

$$W\text{с. нов} = W\text{с. ст} \times \frac{U\text{нов}}{U\text{ст}} \quad \text{и} \quad s\text{с. нов} = s\text{с. ст} \times \frac{Ia\text{. нов}}{Ia\text{. ст}}$$

г) Пересчет обмотки дополнительных полюсов.

Для компенсации реакции якоря обмотка дополнительных полюсов присоединяется к обмотке якоря последовательно, поэтому ток в ней должен протекать такой же, как и в якоре. Следовательно, при пересчете на другое напряжение необходимо исходить из отношения ампервитков добавочных полюсов к ампервиткам якоря. Обычно это отношение находится в пределах от 1,15 ÷ 1,5 и его необходимо стремиться сохранить, иначе изменится и способность компенсации реакции якоря. При изменении числа витков в якоре прямо пропорционально меняется и число витков дополнительных полюсов. Пусть имеем на дополнительном полюсе число витков Wд, по которым проходит ток якоря Ia, тогда число ампервитков дополнительных полюсов найдется по формуле:

$$AW\text{д} = 2p \times W\text{д} \times Ia$$

Число витков обмотки якоря:

$$Wa = \frac{N}{2}$$

по которым проходит ток параллельной ветви $Ia/2a$.
тогда число ампервитков якоря:

$$AWa = \frac{N}{2} \times \frac{Ia}{2a} = \frac{Ia \times N}{4a}$$

Возьмем отношение:

$$\frac{AW\text{д}}{AWa} = \frac{2p \times W\text{д} \times Ia}{\frac{Ia \times N}{4a}} = \frac{8p \times a \times W\text{д}}{N}$$

Эта формула действительна при условии последовательного соединения дополнительных полюсов между собой, а при соединении в параллель – ток в параллельной ветви дополнительной обмотки выразится:

$$\frac{Ia}{a\text{д}}$$

где: $a\text{д}$ – число параллельных ветвей обмотки дополнительных полюсов, тогда

$$AW\text{д} = 2p \times W\text{д} \times \frac{Ia}{a\text{д}}$$

откуда получаем отношение:

$$\frac{AW\text{д}}{AWa} = \frac{8p \times a \times W\text{д}}{N \times a\text{д}}$$

Обозначим данные машины:

$$N\text{ст}, a\text{ст}, W\text{д.ст}, a\text{д.ст} – \text{ до перемотки}$$
$$N\text{нов}, a\text{нов}, W\text{д.нов}, a\text{д.нов} – \text{ после перемотки}$$

отсюда:

$$\frac{AW\text{д}}{AWa} = \frac{8p \times a\text{ст} \times W\text{д.ст}}{N\text{ст} \times a\text{д.ст}} = \frac{8p \times a\text{нов} \times W\text{д.нов}}{N\text{нов} \times a\text{д.нов}}$$

следовательно, новое число витков дополнительных полюсов:

$$W\text{д.нов} = W\text{д.ст} \times \frac{N\text{нов} \times a\text{ст} \times a\text{д.нов}}{N\text{ст} \times a\text{нов} \times a\text{д.ст}}$$

При подборе обмотки дополнительных полюсов, т. е. при определении числа витков на полюсе и поперечного сечения провода, можно пользоваться следующими формулами:

$$W\text{д} = \frac{AW\text{д}}{2p \times Ia} = \frac{0{,}6 \times \tau \times AS}{Ia}$$

где: τ – полюсное деление машины, *см.*, AS – линейная нагрузка якоря, *а/см*.

$$s\text{д.нов} = s\text{д.ст} \times \frac{W\text{д.ст}}{W\text{д.нов}}$$

или

$$s\text{д.нов} = s\text{д.ст} \times \frac{N\text{ст} \times a\text{нов} \times a\text{д.ст}}{N\text{нов} \times a\text{ст} \times a\text{д.нов}}$$

Пример 2. При неизменной мощности P = 3,7 *квт*., n = 1375 *об. мин.* и I = 10,2 *а* требуется пересчитать шунтовой двигатель постоянного тока тип Г-6 с напряжения 440 *в* на напряжение 110 *в*, если дано: а) коллектор: k = 111, б) якорь: z = 28; Nп = 64; ∅ 0,9 ПЭБО в один провод, тип обмотки – простая волновая, размеры паза: 7,5 × 21 $мм^2$.
в) главный полюс: $2p$ = 4, число витков на полюс Wш = 3300, ∅ 0,74 ПБО в один провод; aш = 1, г) дополнительный полюс: $2p$ = 2, число витков на полюс Wд= 152, ∅ 1,95 ПБД в 1 параллельный провод, aд = 1.

При расчете находим следующие величины:
1. Коэффициент полезного действия двигателя:

$$\eta = \frac{P}{U} \times I = \frac{3{,}7 \times 10^3}{440 \times 10{,}2} = 0{,}82$$

2. Число сторон секций обмотки в пазу:

$$S\text{п} = \frac{2k}{z} = \frac{2 \times 111}{28} \approx 8$$

3. Число витков в секции:

$$W\text{п} = \frac{N\text{п}}{s\text{п}} = \frac{64}{8} = 8$$

4. Коэффициент заполнения паза при U = 440 *в*:

$$k\text{п} = \frac{N\text{п} \times s\text{м. из}}{b\text{п} \times h\text{п}} = \frac{64 \times 0{,}785 \times 1{,}06^2}{7{,}5 \times 21} = 0{,}36 \quad \text{где: } d\text{из} = d + 0{,}16 = 0{,}9 + 0{,}16 = 1{,}06 \text{ мм.}$$

5. Номинальный ток двигателя при U =110 *в*:

$$I\text{нов} = I\text{ст} \times \frac{U\text{ст}}{U\text{нов}} = 10{,}2 \times \frac{440}{110} = 40{,}8 \ \ a$$

6. Число эффективных проводов в пазу новой обмотки. Тип обмотки оставляем прежним, так как другую осуществить нельзя.

$$U\text{п. нов} = N\text{п. ст} \times \frac{U\text{нов}}{U\text{ст}} = 64 \times \frac{110}{440} = 16$$

7. Число витков в стороне секций новой обмотки:

$$W\text{п. нов} = \frac{N\text{п. нов}}{S\text{п}} = \frac{16}{2} = 2$$

8. Поперечное сечение провода новой обмотки якоря:

$$s\text{м. нов} = s\text{м. нов} \times \frac{N\text{п. ст}}{N\text{п. нов}} = 0{,}785 \times 0{,}9^2 = \frac{64}{15} = 2{,}55 \quad \text{мм}^2$$

что соответствует по стандарту на обмоточную медь ∅ 1,81 *мм*. (сечение 2,56 $мм^2$).
9. Шаги обмотки по пазам и по коллектору:

$$y\text{п} = \frac{z}{2p} = \frac{28}{4} = 7 \ \ (1-8) \qquad y\text{к} = \frac{k \pm 1}{p} = \frac{111-1}{2} = 55 \ \ (1-56)$$

10. Плотность тока в обмотке якоря:

$$\varDelta a=\frac{Ia.\text{нов}}{2a\times s\text{м}.\text{нов}}=\frac{40{,}8}{2\times 2{,}56}\approx 8 \quad a/\text{мм}^2 \quad \text{где: } Ia\text{нов}\approx I\text{нов}$$

11. Коэффициент заполнения паза при U =110 $в$:

$$k\text{п}=\frac{N\text{п}.\text{нов}\times s\text{м}.\text{из}.\text{нов}}{b\text{п}\times h\text{п}}=\frac{16\times 0{,}785\times 2{,}06^2}{7{,}5\times 21}=0{,}34 \text{ где: } d\text{из}=1{,}81+0{,}25=2{,}06 \text{ мм}.$$

12. Число витков на полюс новой обмотки дополнительных полюсов. Берем aд.нов = 2:

$$W\text{д}.\text{нов}=W\text{д}.\text{ст}\times\frac{N\text{нов}\times a\text{ст}\times a\text{д}.\text{нов}}{N\text{ст}\times a\text{нов}\times a\text{д}.\text{ст}}=152\times\frac{16\times 1\times 2}{64\times 1\times 1}=76$$

13. Поперечное сечение новой обмотки дополнительных полюсов:

$$s\text{д}.\text{нов}=s\text{д}.\text{ст}\times\frac{W\text{д}.\text{ст}}{W\text{д}.\text{нов}}=0{,}785\times 1{,}95^2\times\frac{152}{76}=6 \quad \text{мм}^2$$

что соответствует по стандарту на обмоточную медь ∅ 2,83 ПБД (сечение 6,2 $мм^2$).

14. Плотность тока в обмотках дополнительных полюсов:

$$\varDelta\text{д}=\frac{Ia}{a\text{д}\times s\text{д}}\approx\frac{40{,}8}{2\times 6{,}2}=3{,}3 \ \text{а/мм}^2$$

15. Число витков новой шунтовой обмотки. Так как шунтовую обмотку нельзя пересоединить из-за ее неисправности, то перематываем ее по новому расчету:

$$W\text{ш}.\text{нов}=W\text{ш}.\text{ст}\times\frac{U\text{нов}}{U\text{ст}}=3300\times\frac{110}{440}=825, \quad a\text{ш}.\text{нов}=1$$

т. е. соединение катушек последовательное.

16. Поперечное сечение новой шунтовой обмотки:

$$s\text{ш}.\text{нов}=s\text{ш}.\text{ст}\times\frac{U\text{ст}}{U\text{нов}}=0{,}785\times 0{,}74^2\times\frac{440}{110}=1{,}72 \quad \text{мм}^2$$

что соответствует по стандарту на обмоточную медь ∅ 1,5 ПБО (сечение 1,76 $мм^2$).

22. Пересчет обмотки якоря на другое число оборотов.

Магнитный поток машины обратно пропорционален числу оборотов машины и числу эффективных проводников, что создает в свою очередь обратную пропорциональность между числом оборотов и числом проводников, т. е. из формулы:

$$\Phi=\frac{E\times 60\times a\times 10^8}{n\times N\times p}$$

число оборотов:

$$n=\frac{E\times 60\times a\times 10^8}{\Phi\times N\times p} \quad \text{откуда} \quad n=\frac{1}{N}$$

При пересчете машин постоянного тока на другое число оборотов поток машины должен остаться неизменным при сохранении напряжения на зажимах. Но с изменением числа оборотов изменится и мощность машины примерно пропорционально числу оборотов. Если нужно увеличить число оборотов в два раза, то и мощность следует увеличить примерно в два раза.
Исходя из этого положения, мощность найдется по формуле:

$$P\text{нов} = P\text{ст} \times \frac{n\text{нов}}{n\text{ст}}$$

Число проводников в пазу:

$$N\text{п. нов} = N\text{п. ст} \times \frac{n\text{ст}}{n\text{нов}}$$

так как произведение $n \times N$ является величиной постоянной.
Число витков в секционной стороне:

$$W\text{п. нов} = W\text{п. ст} \times \frac{n\text{ст}}{n\text{нов}} = W\text{п. ст} \times \frac{N\text{п. нов}}{N\text{п. ст}}$$

Площадь поперечного сечения обмотки:

$$s\text{м. нов} = s\text{м. ст} \times \frac{n\text{нов}}{n\text{ст}} = s\text{м. ст} \times \frac{N\text{п. ст}}{N\text{п. нов}}$$

Если машина перематывается на большее число оборотов, то непременно следует рассчитать бандаж якоря (см. расчет бандажа), а также – окружные скорости якоря и коллектора. Кроме того, необходимо проверить коллектор на нагрев и подшипники на удельное давление. При уменьшении числа оборотов необходимо учесть, что вентиляция машины ухудшается. Поэтому плотность тока в обмотке якоря следует принимать меньшую. Для уменьшения перегрева мощность следует снизить на величину большую, чем вытекает из условия пропорциональности между числом оборотов и мощностью.

23. Пересчет обмоток полюсов на другое число оборотов.

Изменив обмоточные данные якоря при переходе на другое число оборотов, необходимо пересчитать обмотки полюсов, так как с изменением мощности сила тока в якоре будет другой. Пересчет будет касаться в первую очередь тех обмоток полюсов, которые соединены последовательно с обмоткой якоря (дополнительная и сериесная). Однако, в некоторых случаях приходится изменить и шунтовую обмотку.

а) Пересчет шунтовой обмотки возбуждения.

Шунтовая обмотка возбуждения, как параллельно соединенная с обмоткой якоря, работает под полным напряжением якоря, которое остается постоянным при пересчете на другое число оборотов, поэтому ампервитки шунтовой обмотки, а также омическое сопротивление остаются неизменными. Отсюда следует, что полюсные катушки параллельного соединения не перематываются при изменении числа оборотов якоря. Однако, если при пересчете на другое число оборотов мы вынуждены изменить магнитный поток в ту или иную сторону (но не более чем на 3 ÷ 5%), то соответственно следует изменить число витков и сечение провода шунтовой обмотки.
При увеличении потока необходимо увеличить ампервитки возбуждения, а для этого надо увеличить площадь поперечного сечения обмотки. Увеличение сечения обмотки влечет за собой уменьшение сопротивления и увеличение тока возбуждения, в результате чего поток возрастает.

Вследствие насыщения магнитной цепи процесс увеличения магнитного потока происходит медленнее изменения ампервитков. Можно принять примерно, что увеличение ампервитков пропорционально квадрату увеличения магнитного потока. Если, например, магнитный поток надо увеличить в 1,03 ÷ 1,05 раза, то ампервитки должны быть увеличены в $(1{,}03)^2 \div (1{,}05)^2$, т. е. в 1,06 ÷ 1,1 раза или на 6 ÷ 10%.
При увеличении магнитного потока на 3 ÷ 5%:

$$AW\text{ш. нов} = [(1{,}03)^2 \div (1{,}05)^2] \times AW\text{ш. ст} = (1{,}06 \div 1{,}1) \times AW\text{ш. ст}$$

$$W\text{ш. нов} = \frac{W\text{ш. ст}}{[(1{,}03)^2 \div (1{,}05)^2]} = \frac{W\text{ш. ст}}{1{,}06 \div 1{,}1}$$

$$s\text{ш. нов} = [(1{,}03)^2 \div (1{,}05)^2] \times s\text{ш. ст} = 1{,}06 \div 1{,}1 \times s\text{ш. ст}$$

$$I\text{ш. нов} = [(1{,}03)^4 \div (1{,}05)^4] \times I\text{ш. ст} = 1{,}12 \div 1{,}21 \times I\text{ш. ст}$$

Вышеуказанные уравнения можно вывести следующим путем:

$$r\text{ш. ст} = \frac{kt \times 2p \times W\text{ш. ст} \times l\text{ш}}{5700 \times s\text{ш. ст}} \quad \text{и} \quad r\text{ш. нов} = \frac{kt \times 2p \times W\text{ш. нов} \times l\text{ш}}{5700 \times s\text{ш. нов}}$$

где: kt – температурный коэффициент сопротивления; lш – средняя длина витка, *см*.

Возьмем отношение левых и правых частей уравнений:

$$\frac{r\text{ш. нов}}{r\text{ш. ст}} = \frac{kt \times 2p \times W\text{ш. нов} \times l\text{ш} \times 5700 \times s\text{ш. ст}}{kt \times 2p \times W\text{ш. ст} \times l\text{ш} \times 5700 \times s\text{ш. нов}} = \frac{W\text{ш. нов} \times s\text{ш. ст}}{W\text{ш. ст} \times s\text{ш. нов}}$$

откуда:

$$r\text{ш. нов} = r\text{ш. ст} \times \frac{W\text{ш. нов} \times s\text{ш. ст}}{W\text{ш. ст} \times s\text{ш. нов}} = r\text{ш. ст} \times \frac{W\text{ш. ст} \times s\text{ш. ст}}{1{,}06 \div 1{,}1 \times W\text{ш. ст} \times 1{,}06 \div 1{,}1 \times s\text{ш. ст}} =$$
$$= \frac{r\text{ш. ст}}{1{,}12 \div 1{,}21}$$

$$I\text{ш. ст} = \frac{U\text{ш}}{r\text{ш}}.\text{ст} \quad \text{и} \quad I\text{ш. нов} = \frac{U\text{ш}}{r\text{ш. нов}} = \frac{U\text{ш} \times 1{,}12 \div 1{,}21}{r\text{ш. ст}}$$

вместо $\frac{U\text{ш}}{r\text{ш. ст}}$ подставим Iш. ст получим:

$$AW\text{ш. нов} = I\text{ш. нов} \times W\text{ш. нов} = 1{,}12 \div 1{,}21 \times I\text{ш. ст} \times \frac{W\text{ш. ст}}{1{,}06 \div 1{,}1} = 1{,}06 \div 1{,}1 \times AW\text{ш. ст}$$

при уменьшении магнитного потока на 3 ÷ 5%:

$$AW\text{ш. нов} = \frac{AW\text{ш. ст}}{[(1{,}03)^2 \div (1{,}05)^2]} = \frac{AW\text{ш. ст}}{1{,}06 \div 1{,}1}$$

$$W\text{ш. нов} = 1{,}06 \times 1{,}1 \times W\text{ш. ст}$$

$$s\text{ш. нов} = \frac{s\text{ш. ст}}{1{,}06 \div 1{,}1} \qquad I\text{ш. нов} = \frac{I\text{ш. ст}}{1{,}12 \div 1{,}21}$$

б) Пересчет обмотки последовательного возбуждения (сериесной).

Пересчет сериесной обмотки, последовательно соединенной с обмоткой якоря, можно производить по следующим формулам:

$$W\text{с. нов} = W\text{с. ст} \times \frac{N\text{нов} \times a\text{ст} \times a\text{с. нов}}{N\text{ст} \times a\text{нов} \times a\text{с. ст}}$$

площадь поперечного сечения проводника:

$$s\text{с. нов} = s\text{с. ст} \times \frac{W\text{с. ст}}{W\text{с. нов}}$$

или, что-то же:

$$W\text{с. нов} = W\text{с. ст} \times \frac{n\text{ст} \times a\text{с. нов}}{n\text{нов} \times a\text{с. ст}} \quad s\text{с. нов} = s\text{с. ст} \times \frac{n\text{нов} \times a\text{с. ст}}{n\text{ст} \times a\text{с. нов}}$$

в) Пересчет обмотки смешанного возбуждения (компаундной).

Так как компаундная обмотка состоит из сериесной и шунтовой, то при пересчете на другое число оборотов ампервитки обеих обмоток необходимо сохранить. При этом шунтовая обмотка возбуждения не изменяется, а число витков сериесной обмотки изменяется обратно пропорционально числам оборотов машины, а сечение провода прямо пропорционально числу оборотов.

г) Пересчет обмотки дополнительных полюсов.

Так как дополнительная обмотка присоединена последовательно к обмотке якоря и с изменением числа оборотов новая полученная мощность вызовет изменение тока, то необходимо изменить данные обмотки.
Пусть до перемотки:

$$W\text{д.ст}, s\text{д.ст}, n\text{д.ст}, a\text{д.ст}$$

а после перемотки:

$$W\text{д.нов}, s\text{д.нов}, n\text{д.нов}, a\text{д.нов}$$

новое число витков дополнительного полюса найдется по формуле:

$$W\text{д. нов} = W\text{д. ст.} \times \frac{n\text{ст} \times a\text{д. нов}}{n\text{нов} \times a\text{д. ст}} \quad \text{или} \quad W\text{д. нов} = W\text{д. ст.} \times \frac{N\text{нов} \times a\text{ст} \times a\text{д. нов}}{N\text{ст.} \times a\text{нов} \times a\text{д. ст}}$$

Объем, занимаемый витками, должен остаться прежним, поэтому следует выдержать следующее соотношение:

$$s\text{д. нов} \times W\text{д. нов} = s\text{д. ст} \times W\text{д. ст}$$

откуда определяем площадь поперечного сечения:

$$s\text{д. нов} = s\text{д. ст} \times \frac{W\text{д. ст}}{W\text{д. нов}} \quad \text{или} \quad s\text{д. нов} = s\text{д. ст} \times \frac{n\text{нов} \times a\text{д. ст}}{n\text{ст} \times a\text{д. нов}}$$

и

$$s\text{д. нов} = s\text{д. ст} \times \frac{N\text{ст} \times a\text{нов} \times a\text{д. ст}}{N\text{нов} \times a\text{ст} \times a\text{д. нов}}$$

Пример 1. Дана шунтовая машина без дополнительных полюсов, мощность которой P = 5 *квт*., напряжение U = 230 *в*, число оборотов n = 1500, число проводов в пазу якоря Nп = 24, Wa = 4, диаметр проводника обмотки 1,56 *мм*. Тип обмотки – простая волновая. Требуется перемотать якорь на 1200 *об. мин.*

Мощность машины определится:

$$P\text{нов} \approx P\text{ст} \times \frac{n\text{нов}}{n\text{ст}} = 5 \times \frac{1200}{1500} = 4 \quad \text{квт}$$

Число проводов в пазу:

$$N\text{п. нов} = N\text{п. ст} \times \frac{n\text{ст}}{n\text{нов}} = 24 \times \frac{1500}{1200} = 30$$

Число витков в секционной группе:

$$Wa.\text{нов} = Wa.\text{ст} \times \frac{n\text{ст}}{n\text{нов}} = 4 \times \frac{1500}{1200} = 5$$

Площадь поперечного сечения обмотки:

$$s\text{м. нов} = s\text{м. ст} \times \frac{n\text{нов}}{n\text{ст}} = 1{,}92 \times \frac{1200}{1500} = 1{,}54 \quad \text{мм}^2$$

что точно соответствует ∅ 1,4 по ГОСТ, а sм.ст = 0,785 × d^2ст = 0,785 × 2,44 = 1,92 *мм*^{2}

Пример 2. При неизменном напряжении U = 440 требуется пересчитать компаундный двигатель постоянного тока (тип HN–30) мощностью P = 1,5 *квт*. I = 4,1 *а* с 1300 *об. мин.* на 1540 *об. мин.*, если дано: а) коллектор: k = 54; Dk = 85 *мм.* б) якорь: Da = 125 *мм.*, z =18; Nп = 156; ∅ 0,8 ПЭБО в один параллельный провод. Тип обмотки – простая петлевая. Размеры паза: 13,5 × 8 × 25. в) главный полюс: 2p = 2; число витков на полюс шунтовой обмотки Wш = 6350; ∅ 0,3 ПБО в один провод; aш = 1, Iш.гор = 0,2 *а*. Число витков на полюс сериесной обмотки Wc = 34; ∅ 1,2 ПБО в один провод; aс = 1, г) дополнительный полюс: 2p = 1; число витков на полюс Wд = 456; ∅ 1,25 ПБД в один провод: aд = 1.
При расчете находим следующие величины:
1. Коэффициент полезного действия двигателя при n = 1300 *об. мин.*

$$\eta = \frac{P}{U \times I} = \frac{1{,}5 \times 10^3}{440 \times 4{,}1} = 0{,}83$$

2. Число сторон секций обмотки в пазу:

$$S\text{п} = \frac{2k}{z} = \frac{2 \times 54}{18} = 6$$

3. Число витков в стороне секций:

$$W\text{п} = \frac{N\text{п}}{S\text{п}} = \frac{156}{6} = 26$$

4. Коэффициент заполнения паза при n = 1300 *об. мин.*:

$$k\text{п} = \frac{N\text{п} \times s\text{м. из}}{b\text{п. ср} \times h\text{п}} = \frac{156 \times 0{,}785 \times 0{,}96^2}{10{,}7 \times 25} = 0{,}42 \quad \text{где: } b\text{п. ср} = \frac{13{,}5 + 8}{2} = 10{,}7 \ \text{ мм.}$$

и

$$d\text{м. ср} = d + 0{,}16 = 0{,}8 + 0{,}16 = 0{,}96 \quad \text{мм.}$$

5. Мощность двигателя при n = 1540 *об. мин.*:

$$P\text{нов.} \approx P\text{ст} \times \frac{n\text{нов}}{n\text{ст}} = 1{,}5 \times \frac{1540}{1300} = 1{,}78 \quad \text{квт}$$

6. Номинальный ток двигателя при n = 1540 *об. мин.*:

$$I\text{нов} \approx I\text{ст} \times \frac{n\text{нов}}{n\text{ст}} = 4{,}1 \times \frac{1540}{1300} = 4{,}86 \quad a$$

7. Число эффективных проводов в пазу новой обмотки:

$$N\text{п. нов} = N\text{п. ст} \times \frac{n\text{ст}}{n\text{нов}} = 156 \times \frac{1300}{1540} = 132$$

8. Число витков в стороне секций новой обмотки:

$$W\text{п. нов} = \frac{N\text{п. нов}}{s\text{п}} = \frac{132}{6} = 22$$

9. Поперечное сечение новой обмотки якоря:

$$s\text{м. нов} = s\text{м. ст} \times \frac{N\text{п. ст}}{N\text{п. нов}} = 0{,}785 \times 0{,}8^2 \times \frac{156}{132} = 0{,}595 \quad \text{мм}^2$$

что соответствует по стандарту на обмоточную медь Ø 0,86 ПЭБО (сечение 0,58 *мм*^{2}).

10. Шаги обмотки по пазам и по коллектору:

$$y\text{п} = \frac{z}{2p} = \frac{18}{2} = 9 \quad (1-10) \quad y\text{к} = +1 \quad (1-2)$$

11. Плотность тока в обмотке якоря:

$$\Delta a = \frac{Ia\text{. нов}}{2a \times s\text{м. нов}} = \frac{4{,}86}{2 \times 0{,}58} = 4{,}2 \text{ а/мм}^2 \quad \text{где: } Ia\text{нов} \approx I\text{нов}$$

12. Коэффициент заполнения паза при *n* = 1540 *об. мин.*:

$$k\text{п. нов} = \frac{N\text{п. нов} \times s\text{м. из. нов}}{b\text{п. ср} \times h\text{п}} = \frac{132 \times 0{,}785 \times 1{,}02^2}{10{,}7 \times 25} = 0{,}405$$

$$\text{где: } d\text{из} = d + 0{,}16 = 0{,}86 + 0{,}16 = 1{,}02 \text{ мм.}$$

13. Окружные скорости якоря и коллектора:

$$v\text{а} = \frac{\pi \times Da \times n}{60 \times 1000} = \frac{3{,}14 \times 125 \times 1540}{60 \times 1000} = 10 \text{ м/сек.}$$

$$v\text{к} = \frac{\pi \times Da \times n}{60 \times 1000} = \frac{3{,}14 \times 85 \times 1540}{60 \times 1000} = 7 \text{ м/сек.}$$

что вполне допустимо.

14. Число витков на полюс новой обмотки дополнительных полюсов:

$$W\text{д. нов} = W\text{д. ст} \times \frac{n\text{ст} \times a\text{д. нов}}{n\text{нов} \times a\text{д. ст}} = 456 \times \frac{1300 \times 1}{1540 \times 1} = 386$$

15. Поперечное сечение новой обмотки дополнительных полюсов:

$$s\text{д. нов} = s\text{д. ст} \times \frac{W\text{д. ст}}{W\text{д. нов}} = 0{,}785 \times 1{,}25^2 \times \frac{456}{386} = 1{,}44 \quad \text{мм}^2$$

что соответствует по стандарту на обмоточную медь Ø 1,35 ПБО (сечение 1,43 *мм*^{2}).

16. Плотность тока в обмотке дополнительных полюсов:

$$\varDelta д = \frac{Ia}{aд \times sд} = \frac{4,66}{1 \times 1,43} = 3,27 \text{ а/мм}^2 \quad \text{где: } Ia = I - Iш = 4,86 - 0,2 = 4,66\ a$$

17. Число ампервитков компаундной обмотки:

$$AWк = AWш.ст + AWс.ст = Iш.ст \times Wш.ст + Ia.ст \times Wс.ст$$
$$= 0,2 \times 6350 + (4,1 - 0,2) \times 34 = 1270 + 133 = 1403$$

18. Число витков новой шунтовой обмотки. Так как при пересчете обмотки якоря на другое число оборотов магнитный поток не изменился, то шунтовую обмотку оставляем без изменения: Wш = 6350; Ø 0,3 ПБО в один провод, aш = 1.
19. Число витков новой сериесной обмотки:

$$Wс.нов = \frac{AWк - AWш}{Ia.нов} = \frac{1403 - 1270}{4,66} = 29$$

где:

$$AWш.ст = 0,2 \times 6350 = 1270 \quad AWк = AWк.ст = 1403$$

20. Поперечное сечение новой сериесной обмотки:

$$sс.нов = sс.ст \times \frac{Wс.ст}{Wс.нов} = 0,785 \times 1,2^2 \times \frac{34}{29} = 1,33 \quad \text{мм}^2$$

что соответствует по стандарту на обмоточную медь Ø 1,3 *мм*. (сечение 1,32 $мм^2$).

24. Пересчет машины на другой режим работы.

Согласно принципу обратимости, открытому в 1833 г. русским академиком Э. Х. Ленцем, электрическую машину постоянного тока можно использовать и в качестве генератора и в качестве двигателя. Переход на другой режим работы повлечет за собой изменение числа оборотов и соответственно мощности машины. Известно, что э. д. с., индуктированная (наведенная) в обмотке якоря генератора, больше, чем напряжение генератора на зажимах на величину падений напряжения в обмотках якоря, сериесной, дополнительной и на коллекторе. Электродвижущая сила, индуктированная в обмотке якоря двигателя, наоборот, меньше напряжения на зажимах на величину падений напряжения в обмотках и на коллекторе.
Отсюда:

$$Eг = Uг + \varDelta Uг \quad Eдв = Uдв - \varDelta Uдв$$

где: $\varDelta U$г и $\varDelta U$дв – падения напряжений в обмотках и на коллекторе генератора и двигателя.

$$\varDelta Uг \approx \varDelta Uдв = \varDelta U$$

значения $\varDelta U\%$ можно брать по табл. 9.
Так как при пересчетах на другое напряжение и на другое число оборотов машин постоянного тока основным принципом ставится неизменный магнитный поток машины, то при переходе с одного режима на другой, безусловно, изменяется число оборотов. При переходе от режима двигателя к режиму генератора следует увеличить число оборотов в отношении э. д. с. генератора к э. д. с. двигателя. Соотношения э. д. с. и чисел оборотов следующие:

$$\frac{nг}{nдв} = \frac{Eг}{Eдв} \approx \frac{Uг + \varDelta U}{Uдв - \varDelta U}$$

Обычно напряжение на зажимах генератора берется больше напряжения на зажимах двигателя, поэтому с целью сохранения магнитного потока машины следует увеличить число оборотов на 5 ÷ 10%, поэтому окончательный вид формулы будет:

$$n\text{г} = 1{,}05 \div 1{,}1 \times n\text{дв} \times \frac{(U\text{г} + \Delta U)}{(U\text{дв} - \Delta U)} \text{ или приближенно } n\text{г} \approx 1{,}25 \div 1{,}4 \times n\text{дв}$$

Разница в числах оборотов двигателя и генератора примерно колеблется в пределах 25 ÷ 40%, причем число оборотов генератора всегда выше числа оборотов двигателя при том же напряжении на зажимах. Больший предел относится к машинам тихоходным и малой мощности. Безусловно, мощность машины при работе ее генератором увеличится, а нагрев, лимитирующий мощность машины, не должен быть больше нагрева двигателя, лучше несколько меньше.
Сила тока в обмотке якоря в случае генераторного режима равна сумме сил токов внешней цепи и обмотки шунтового возбуждения:

$$Ia\text{г} = I\text{н} + I\text{ш}$$

Сила тока в обмотке якоря в случае двигательного режима определится как разность токов:

$$Ia\text{дв} = I\text{н} - I\text{ш}$$

Для сохранения нагрева машины необходимо, чтобы $Ia\text{г} = Ia\text{дв}$, тогда при генераторном режиме номинальный ток машины:

$$I\text{г} = Ia\text{г} - I\text{ш} = (I\text{н} - I\text{ш}) - I\text{ш} = I\text{н} - 2 \times I\text{ш}$$

то есть:

$$I\text{г} = I\text{н} - 2 \times I\text{ш}$$

Полезная мощность генератора:

$$P\text{г} = U\text{г} \times I\text{г} = U\text{г} \times (I\text{н} - 2 \times I\text{ш})$$

Ввиду незначительной величины тока возбуждения машины по сравнению с током внешней сети или номинальным $I\text{н}$ им можно пренебречь и получим приближенное значение мощности генератора:

$$P\text{г} \approx U\text{г} \times I\text{н}$$

Соотношение мощности генератора к мощности двигателя:

$$P\text{г} \approx P\text{дв} \times \frac{n\text{г}}{n\text{дв}}$$

Пример 1. Шунтовой двигатель мощностью P = 7,5 *квт.*, с числом оборотов n =1500 *об. мин.*, напряжением на зажимах U = 220 *в* и падением напряжения ΔU = 12 *в* необходимо использовать как генератор постоянного тока. Определить число оборотов и мощность генератора. Число оборотов генератора:

$$n\text{г} = 1{,}1 \times n\text{дв} \times \frac{U\text{г} + \Delta U}{U\text{дв} - \Delta U} = 1{,}1 \times 1500 \times \frac{230 + 12}{220 - 12} = 1{,}1 \times 1500 \times \frac{242}{208} = 1920 \text{ об/мин}$$

Мощность генератора:

$$P\text{г} \approx P\text{дв} \times \frac{n\text{г}}{n\text{дв}} = 7{,}5 \times \frac{1920}{1500} = 9{,}6 \text{ квт.}$$

номинальный ток:

$$I\text{н} = \frac{P\text{г}}{U\text{г}} = \frac{9{,}6 \times 10^3}{230} = 41{,}7 \quad a$$

Пример 2. Шунтовой генератор мощностью P = 15 *квт*., напряжением на зажимах 115 *в*, падением напряжения 5 *в* и числом оборотов n = 700 необходимо использовать в качестве двигателя. Определить число оборотов и мощность двигателя.
Число оборотов двигателя:

$$n\text{дв} \approx \frac{n\text{г} \times U\text{дв} - \Delta U}{1{,}1 \times U\text{г} + \Delta U} = \frac{700 \times (110 - 5)}{1{,}1 \times (115 + 5)} = \frac{700 \times 105}{1{,}1 \times 120} = 560 \text{ об. мин.}$$

Мощность двигателя:

$$P\text{дв} \approx P\text{г} \times \frac{n\text{дв}}{n\text{г}} = \frac{15 \times 560}{700} = 12 \quad \text{квт.}$$

25. Восстановление паспорта машины, не имеющей обмоток и паспортной таблички.

Если удастся по внешнему и внутреннему осмотру определить завод–изготовитель (или фирму) и тип машины постоянного тока, то по длине активной стали, числу пазов в якоре, числу коллекторных пластин и наружному диаметру якоря (la, z, k, Da) можно, пользуясь справочными материалами, найти обмоточные данные и соответствующий паспорт. При отсутствии машины в таблицах обмоточных данных необходимо по типу, ближайшей мощности, числу оборотов, размерам активной стали и других, ориентируясь по электромагнитным нагрузкам (Bl и Δ), подобрать обмотку путем небольшого пересчета. До этого, безусловно, нужно сделать подробные замеры машины.
Не зная ни типа машины, ни завода–изготовителя, следует идти по пути приближенного расчета, задаваясь для данной машины допустимыми плотностями токов и максимальной индукцией в воздушном зазоре.
Для безыскровой коммутации, компенсации влияния реакции якоря и получения паспортных данных машины должно быть точное совпадение суммарных ампервитков с ампервитками возбуждения главных полюсов–определенное число ампервитков добавочных полюсов.

Приближенный расчет машины постоянного тока:

1. Данные для поверочного расчета:
а) номинальное напряжение U *в.*
б) номинальное число оборотов *n, об. мин.*
в) система возбуждения (шунтовая, сериесная, компаундная).
г) режим работы (генератор, двигатель).
д) число пазов якоря z.
е) длина якоря и коллектора la и lк, *мм*.
ж) внешний диаметр якоря и коллектора Da и Dк.
з) число коллекторных пластин k.
и) число главных и дополнительных полюсов $2p$ и $2p$д.
к) размеры паза bп.ср × hп *мм*^{2}.
л) размеры зубца bzмин и bzмакс *мм*.
м) высота спинки якоря hа *мм*.
н) высота спинки станины (материал) hj, *мм*. и длина станины lj, *мм*.
о) размеры главного полюса lm, *мм*., bm, *мм*., hm., *мм*; длина дуги bi, *мм*. (материал).
п) размеры дополнительного полюса: lд, *мм*., hд, мм., lдмакс, *мм*.
р) минимальный воздушный зазор между главным полюсом и якорем δ *мм*. (рис. 30 а).

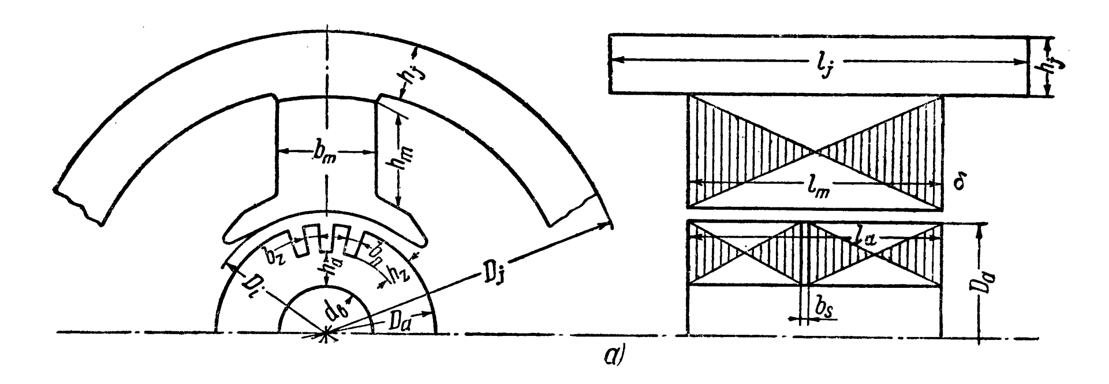


Рис. 30 а. Эскиз магнитной цепи машины постоянного тока.

2. Зубцовое деление якоря по коронкам зубцов:

$$t = \frac{\pi \times Da}{z} \text{ см.}$$

3. Полюсное деление:

$$\tau = \frac{\pi \times Da}{2p} \text{ см.}$$

4. Сечение в воздушном зазоре:

$$sl = ai \times li \times \tau$$

где: *sl* – сечение в воздушном зазоре, *см*²., *ai* – коэффициент магнитного перекрытия или коэффициент идеальной полюсной дуги (рис. 30 б):

$$ai = \frac{Bl\text{ср}}{Bl}$$

ai = 0,65 ÷ 0,75 в машинах без дополнительных полюсов; *ai* = 0,5 ÷ 0,72 для машин, имеющих дополнительные полюсы; *li* – идеальная длина, см.

$$li = \frac{lm + \frac{la + l}{2}}{2}$$

la – длина активной стали с каналами; *l* – длина активной стали без каналов.

$$la = l + ns \times bs$$

где: *ns* – число каналов; *bs* – ширина вентиляционного канала, *см*.
5. Максимальная магнитная индукция *Be* в воздушном зазоре. Выбираем *Be* по табл. 5.
6. Магнитный поток машины при нагрузке:

$$\text{Фн} = B\text{е} \times se \quad \text{мкс}$$

7. Тип обмотки якоря.
8. Число эффективных проводов в пазу якоря:

$$N\text{п} = \frac{E \times 60 \times a \times 10^8}{n \times z \times p \times \text{Фн}} = \text{целое число}$$

где:

$E = U + \Delta U$ для генератора, *в* $E = U - \Delta U$ для двигателя, *в*

U– номинальное напряжение, *в*; *ΔU*– падение напряжения в обмотках и на коллекторе, *в*:

$$\Delta U = \varepsilon \times U$$

где: ε – относительное падение напряжения; ε = 10% для машин мощностью около 1 ÷ 2 *квт*. $\varepsilon \approx$ 5% для машин средней мощности (10 ÷ 100 *квт*.); ε = 2% для машин большой мощности. Значения ΔU% от номинальной мощности приведены в табл. 9.

Таблица 9. Таблица зависимости ΔU % от номинальной мощности машины Pн.

Pн, *квт.*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	200	300	400	600	800	1000
$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_н} \times 100\%$	10	8	7,3	6,7	6,4	5,9	5,6	5,4	5	4,8	4,2	3,7	3,4	3,2	3	2,9	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,2	2	1,8	1,6

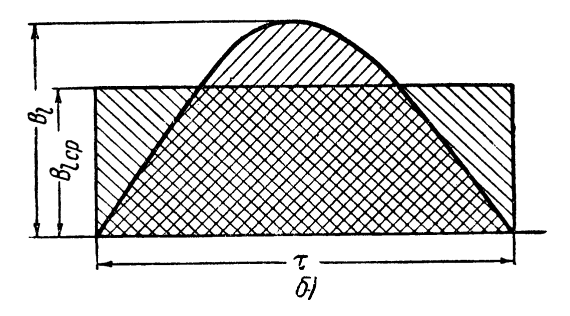


Рис. 30 б. График коэффициента магнитного перекрытия.

При точных расчетах необходимо подсчитать э. д. с., исходя из отдельных падений напряжения, в электрической цепи:

$$\Delta U = Ia \times \Sigma r\text{гор} + \Delta E = Ia \times (r\text{д. гор} + r\text{с. гор} + ra.\text{гор}) + \Delta E$$

где сопротивление обмотки дополнительных полюсов:

$$r\text{д} = \frac{kt \times 2p\text{д} \times W\text{д} \times l\text{д}}{5700 \times s\text{д} \times a\text{д}^2} \ \text{ом}$$

сопротивление сериесной обмотки:

$$r\text{с} = \frac{kt \times 2p\text{д} \times W\text{с} \times l\text{с}}{5700 \times s\text{с} \times a\text{с}^2} \ \text{ом}$$

сопротивление обмотки якоря:

$$ra = \frac{kt \times z \times N\text{п} \times l\text{обм}}{5700 \times s\text{м} \times (2a)^2} \ \text{ом}$$

где: lд, lс, lобм–средние длины витков обмоток, *см*.

$$l\text{обм} \approx la + k\text{р} \times \frac{\pi \times (Da - h\text{п})}{2p}$$

где: kр –коэффициент:

kр = 1,25 для 2p = 2; kр = 1,5 для 2p = 4; kр = 1,75 для 2p = 6; kр = 2 для 2p = 8.

Для полюсов круглого сечения:

$$l\text{д} = \pi \times (Dm + b\text{к}) \ \text{и} \ \ l\text{с} = \pi \times (Dm + b\text{к})$$

Dm – диаметр полюса в *см*.

Для полюсов прямоугольного сечения:

$$l\text{с} = 2 \times (lm + b\text{к}) + 2 \times (bm + b\text{к}) \text{ и } l\text{д} = 2 \times (l\text{д} + b\text{к}) + 2 \times (b\text{д} + b\text{к})$$

bк = 2 ÷ 6 *см*. – толщина катушки.
ΔE – падение напряжения на коллекторе:
ΔE = 0,6 *в* для низковольтных машин до 4 *в*;
ΔE = 1,2 *в* для машин до 100 *в*;
ΔE = 2 *в* для машин до 440 *в*;
kt – температурный коэффициент увеличения сопротивления:

$$kt = 1 + at \times t$$

где *at* – тепловой коэффициент сопротивления (для меди *at* = 0,004);
kt = 1 + 0,004 × 65= 1,26 для класса изоляции А (Δt°C = 65°C);
kt = 1 + 0,004 × 85 = 1,34 для класса изоляции В (Δt°C = 85°C).
9. Число секционных сторон в пазу:

$$S\text{п} = \frac{2k}{z}$$

10. Число витков в секционной стороне *W*п:

$$W\text{п} = \frac{N\text{п}}{S\text{п}}$$

11. Основная проверка коллектора.
а) Среднее напряжение между двумя соседними коллекторными пластинками:

$$U\text{ср} = \frac{U \times 2p}{k} \leq 11 \div 21 \quad \text{в}$$

*U*ср = 18 ÷ 21 *в* для малых машин; *U*ср = 14 ÷ 18 *в* для средних машин; *U*ср = 11 ÷ 14 *в* для больших машин. Для машин, имеющих компенсационную обмотку, можно повысить среднее напряжение на 40 ÷ 50%.
б) Окружная скорость коллектора *v*к:

$$v\text{к} = \frac{\pi \times D\text{к} \times n}{60 \times 1000} \leq 35 \text{ м/сек}$$

где: *D*к – внешний диаметр коллектора, *мм*.
12. Окружная скорость якоря *va*:

$$v\text{а} = \frac{\pi \times Da \times n}{60 \times 1000} \text{ м/сек}$$

где: *va* ≤ 17 *м/сек*. для машин с ременной передачей; *va* ≤ 40 ÷ 60 *м/сек*. для нормальных машин и *va* ≤ 60 ÷ 90 *м/сек*. и выше для турбогенераторов.
13. Находим поперечное сечение провода по коэффициенту заполнения паза *k*п:

$$s\text{м. из} = \frac{k\text{п} \times b\text{п. ср} \times h\text{п}}{N\text{п}}$$

где *s*м.из – площадь поперечного сечения провода с изоляцией, $мм^2$.

$$s\text{м. из} = 0{,}785 \times d\text{из}^2, \quad d\text{из} = \sqrt{\frac{s\text{м. из}}{0{,}785}}$$

Обычно коэффициент заполнения паза для машин напряжением до 500 *в* находится в пределах kп < 0,38 ÷ 0,45. Можно в среднем задаваться kп = 0,4.

14. Подбираем плотность тока Δa в обмотке якоря по табл. 7.

15. Находим ток в якоре:

$$Ia = ia \times 2a$$

(для простой волновой 2a = 2, для простой петлевой 2a = 2p), где ia = Δа × sм – ток в параллельной ветви.

16. Линейная нагрузка якоря:

$$AS = \frac{ia \times N}{\pi \times Da} = \frac{I\text{a} \times N\text{п}}{2a \times t} = \frac{ia \times N\text{п}}{t} \qquad \text{где } t\text{:} \quad t = \frac{\pi \times Da}{z} \quad \text{шаг по зубцам якоря, см.}$$

AS не должна выходить из пределов, указанных в табл. 5.

17. Проверяем обмотку на нагрев:

$$\Delta t°\text{C} = AS \times \Delta a \leq 1000 \div 1800$$

18. Уточненный магнитный поток машины:

$$\text{при холостом ходе: } \Phi\text{о} = \frac{U \times 60 \times a \times 10^8}{n \times z \times N\text{п} \times p} \quad \text{при нагрузке: } \Phi\text{н} = \frac{E \times 60 \times a \times 10^8}{n \times z \times N\text{п} \times p}$$

19. Число оборотов при холостом ходе nо:

$$n\text{о} \approx \frac{U\text{н}}{\left(\frac{p}{a} \times \frac{10^{-8}}{60} \times z \times N\text{п}\right) \times \Phi\text{н}} \quad \text{об/мин}$$

20. Максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре:

$$\text{при холостом зоде: } Bl\text{o} = \frac{\Phi\text{о}}{sl} \quad \text{при нагрузке: } Bl = \frac{\Phi\text{н}}{sl}$$

Найденная индукция не должна выходить из пределов 3500 ÷ 10000 *гс*.

21. Магнитная индукция в спинке якоря при нагрузке:

$$Ba = \frac{\Phi\text{н}}{2s\text{a}} \quad \text{где: } 2sa \text{ удвоенное сечение спинки якоря см}^2 \quad 2s\text{a} = 2 \times k\text{ст} \times h\text{a} \times l$$

kст = коэффициент заполнения активной стали; kст = 0,97 для листов без дополнительной изоляции; kст = 0,93 ÷ 0,95 для лакировки; kст = 0,9 для бумаги.

Ba ≤ 5000 ÷ 16000 *гс* (см. табл. 9а) в зависимости от частоты тока f:

$$f = \frac{p \times n}{60} \quad \text{гц}$$

Таблица 9а.

f, гц	5	20	30	40	50	60	100
Ba, гс	16000	12000	10000	9500	9000	8000	5000

22. Магнитные индукции в зубце якоря при нагрузке:
а)

$$B_{z\text{макс}} = \frac{B_l \times t \times l_i}{b_{z\text{мин}} \times k_{\text{ст}} \times l} \quad B_{z\text{макс}} \le 19000 \div 23000 \text{ гс}$$

б)

$$b_{z\text{мин}} = \frac{\pi \times (D_a - 2h_{\text{п}})}{z} - b_{\text{п}}$$

в)

$$B_{z\text{мин}} = B_{z\text{макс}} \times \frac{b_{z\text{мин}}}{b_{z\text{макс}}} \quad B_{z\text{ср}} = B_{z\text{макс}} \times \frac{b_{z\text{мин}}}{b_{z\text{ср}}}, \qquad \text{где: } b_{z\text{ср}} = \frac{b_{z\text{мин}} + b_{z\text{макс}}}{2}$$

23. Магнитная индукция в главном полюсе при нагрузке:

$$B_m = \frac{\Phi_m}{s_m} \qquad \text{где: } \Phi_m - \text{ поток в главном полюсе: } \Phi_m = \sigma_m \times \Phi_{\text{н}} \ \text{ мкс.}$$

где: σ_m – коэффициент рассеяния полюсов при нагрузке: $\sigma_m = 1{,}08 \div 1{,}25$
s_m – сечение полюса, *см*^{2}., $s_m = b_m \times l_m$ – для сплошного полюса; $s_m = 0{,}975 \times b_m \times l_m$ – для шихтованного. $B_m \le 8000 \div 17000$ *гс* (см. табл. 6).
24. Магнитная индукция в спинке станины:

$$B_j = \frac{B_m}{2s_j}$$

где: $2s_j$ – удвоенное сечение спинки станины, *см*^{2}.

$$2s_j = 2 \times h_j \times l_j$$

l_j – длина спинки, *см*., h_j – высота спинки, *см*. Обычно $B_j \le 8000 \div 15000$ *гс* (см. табл. 6).
25. Магнитная индукция в дополнительном полюсе:

$$B_{\text{д}} = \frac{\Phi_{\text{д}}}{s_{\text{д}}} \quad \text{где: } s_{\text{д}} \text{ сечение дополнительного полюса см}^2 \quad s_{\text{д}} = b_{\text{д}} \times l_{\text{д}}$$

Обычно $B_{\text{д}} = 6000 \div 8000$ *гс*, так как необходимо слабое насыщение дополнительных полюсов, чтобы магнитный поток возрастал прямо пропорционально силе тока якоря. Если магнитные индукции не выходят из пределов допустимых, то можно расчет вести дальше.
26. Число витков и площадь поперечного сечения обмотки дополнительных полюсов $W_{\text{д}}$ и $s_{\text{д}}$:

$$W_{\text{д}} = \frac{AW_{\text{д}}}{I_{\text{а}}}$$

где $AW_{\text{д}}$– число ампервитков, приходящееся на полюс. Ориентировочно найдем:

$$AW_{\text{д}} \approx 1{,}2 \times AW_{\text{р.я}} = 0{,}6 \times \tau \times AS \quad \text{где:} \qquad AW_{p.\text{я}} - \text{ ампервитки реакции якоря.}$$

Площадь поперечного сечения обмотки:

$$s_{\text{д}} = \frac{I_{\text{а}}}{\Delta_{\text{д}} \times a_{\text{д}}}$$

где $\Delta_{\text{д}} = 1{,}5 \div 4$ а/*мм*^{2} – плотность тока (см. табл. 4).

27. Коэффициент воздушного зазора:

$$kc = \frac{t + 10 \times \delta}{bz + 10 \times \delta}$$

где bz = (t – bпрор) – ширина коронки зубца якоря, *см*; δ – односторонний минимальный воздушный зазор, *см*.

28. Суммарные ампервитки машины на полюс при нагрузке:

$$\Sigma AW = AWl + AWz + AWa + AWm + AW'l + AWj + AWd$$

где:

а) ампервитки на полюс в воздушном зазоре:

$$AWl = 0{,}8 \times kc \times \delta \times Bl$$

б) ампервитки зубца якоря:

$$AWz = h\text{п} \times \left(\frac{awz\text{макс} + awz\text{мин} + 4 \times awz\text{ср}}{6}\right)$$

по табл. 10 находим удельные ампервитки $awz = f \times Bz$.

в) ампервитки на полюс спинки якоря:

$$AWa = awa \times La \times \gamma a$$

где: γa – коэффициент, характеризующий неравномерное распределение силовых линий вдоль спинки; γa = 0,3 ÷ 0,637 в зависимости от индукции в спинке (чем выше индукция, тем меньше γa); $\gamma a = f \times Ba$ находится по кривой рис. 71.

По табл. 10 находим:

$$awa = f \times Ba$$

La – средняя длина силовых линий на полюс в спинке якоря, *см*.,

$$La = \frac{\pi \times (Da - 2 \times hz - h\text{a})}{4p} \text{ см.}$$

г) ампервитки в главном полюсе:

$$AWm = awm \times hm, \qquad \text{где по табл. 10 находим: } awm = f \times Bm$$

д) ампервитки в стыке полюса со станиной:

$$AW'l = 0{,}8 \times Bm \times \delta'm$$

где: $\delta'm$ = 0,01 ÷ 0,02 *см*., (0,01 – крепление болтами, 0,02 – ласточкиным хвостом);

е) ампервитки в спинке станины:

$$AWj = awj \times Lj \times \gamma j$$

где: $awi = f \times Bj$ по табл 10, $\gamma j = f \times Bj$ по кривой рис. 71, Lj – средняя длина силовых линий: на полюс в спинке станины, *см*.:

$$Lj = \frac{\pi \times (Da + 2 \times \delta + 2 \times h\text{p} + hj)}{4p} \text{ см.}$$

так как обычно ампервитки в спинке станины незначительны, то ими в расчетах можно пренебречь.

ж) ампервитки реакции якоря по продольной оси на полюс:

$$AWd = 0{,}06 \div 0{,}1 \times \tau \times AS$$

точнее находятся по характеристике холостого хода.
29. Число витков и площадь поперечного сечения обмотки в случае машины сериесного возбуждения:

$$W\text{с} = \frac{\Sigma AW}{I\text{а}}$$

где: ΣAW – число ампервитков возбуждения, приходящееся на полюс.
Площадь поперечного сечения обмотки:

$$s\text{с} = \frac{I\text{а}}{\Delta\text{с} \times ac}$$

где Δс =1 ÷ 3 *мм*^{2} – плотность тока (см. табл. 4).
30. Число витков на полюс и площадь поперечного сечения шунтовой обмотки Wш, sш:

$$W\text{ш} = \frac{\Sigma AW}{I\text{ш}}$$

где: ΣAW – число ампервитков возбуждения, приходящееся на полюс; Iш –ток в шунте, а Iш = (1,2 ÷ 10%) × Iн.

Таблица 10. Таблица намагничивания.

	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
Электротехническая сталь толщиной 0,5 *мм*.										
8000	4	4	4,1	4,1	4,2	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6
9000	4,8	4,8	4,9	5	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6
10000	5,7	5,8	5,9	6	6,2	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1
11000	7,2	7,4	7,5	7,7	8	8,2	8,5	8,7	8,9	12,3
12000	9,3	9,6	9,9	10,1	10,5	11	11,3	11,6	11,9	12,3
13000	12,8	13,3	13,8	14,2	14,6	15	15,7	16,3	17	17,5
14000	13,2	19	19,8	20,6	21,2	22	23,5	25	26,5	28
15000	29	30	31	32,5	33,5	35	37	39	41	43
16000	47	50	53	56	60	63	67	71	75	79
17000	83	88	93	98	104	110	116	122	128	135
18000	142	149	156	163	171	179	187	196	205	214
19000	224	235	246	257	269	281	294	308	322	336
20000	350	364	378	393	408	423	439	457	476	495
21000	515	535	556	577	598	620	643	666	689	712
22000	735	754	783	807	831	855	880	905	930	955
23000	980	1006	1032	1058	1085	1110	1135	1165	1195	1230
Электротехническая сталь толщиной 1 ÷ 2 *мм*.										
16000	45	47	49	51	53	55	57	59	61	63
17000	65	67	70	75	78	80	85	88	92	98
18000	102	108	113	118	124	130	138	148	158	168
19000	180	190	200	208	215	230	240	252	262	278
20000	290	300	310	320	330	340	350	360	370	380

По приблизительно намеченной мощности:

$$\text{для генератора: } P_г \approx U \times I \times 10^3 \text{ квт}$$
$$\text{для двигателя: } P_{дв} \approx U \times \eta \times I \times 10^3 \text{ квт}$$

находим:

$$\frac{I_ш}{I_н} \times 100$$

в табл. 11, задаваясь η по табл. 8.
Зная ток шунта и задавшись плотностью тока, можно определить площадь поперечного сечения:

$$s_ш = \frac{I_ш}{\Delta_ш \times a_ш}$$

где: $\Delta_ш = 1{,}2 \div 4$ $а/мм^2$ (см. табл. 4).

Процентное отношение тока шунта к току якоря в зависимости от мощности дано в табл. 11.

Таблица 11.

P, *квт.*	$\frac{I_ш}{I_н} \times 100$
0,5 ÷ 1	8 ÷ 10%
5	7%
10	5%
20	4%
40	3%
60	2,5%
100	2%
300	1,5%
1000	1,2%

Необходимо площадь поперечного сечения обмотки проверить по формуле:

$$s_ш = \frac{1{,}1 \div 1{,}2 \times k_t \times \Sigma AW \times 2p \times l_ш}{5700 \times U} \text{ мм}^2$$

где: $l_ш$ – средняя длина витка, *см.*
Для полюсов круглого сечения:

$$l_ш = \pi \times (D_m + b_к)$$

для полюсов прямоугольного сечения:

$$l_ш = 2 \times (l_m + b_к) + 2 \times (b_m + b_к)$$

$b_к = 2 \div 6$ *см.* – толщина катушки; $(1{,}1 \div 1{,}2)$–коэффициент запаса сечения.
Сопротивление шунтовой обмотки:

$$r_ш = \frac{k_t \times 2p \times W_ш \times l_ш}{5700 \times s_ш} \text{ ом}$$

Проверка на заполнение обмоткой пространства между полюсами:

$$s_\delta \geq 2 \times h_к \times b_к$$

где: s_δ – сечение пространства между полюсами, $см^2$; $h_к$ – высота катушки, *см.*; $b_к$ – толщина катушки, *см.*

$$s\delta = \left[\frac{\tau\text{мин} + \tau\text{макс} + 2 \times (bm + 2 \times b\text{к})}{2}\right] \times hm \quad \text{см}^2$$

$$\tau\text{мин} \approx \tau = \frac{\pi \times D\text{a}}{2p} \quad \text{см.} \quad \tau\text{макс} = \frac{\pi \times (D\text{a} + 2 \times hm)}{2p} \quad \text{см.}$$

$$h\text{к} = \frac{\Sigma AW}{100 \times \Delta\text{ш} \times k\text{в} \times b\text{к}}$$

где kв – коэффициент заполнения обмотки на электромагнитах; kв = 0,7 ÷ 0,8 – для ленточной обмотки гнутой на ребро; kв ≈ 0,8 × $(d/d_1)^2$ – для круглой обмотки; d_1 – диаметр изолированного провода; d – диаметр голого провода. Такую проверку следует провести также для обмоток дополнительных полюсов и сериесной обмоток.

31. Номинальный ток машины.

$$\text{ток якоря:}\, Ia = I\text{н} \pm I\text{ш}$$

(знак **+** для генератора, **–** для двигателя)
откуда для генератора: $I\text{н} = Ia - I\text{ш}$
для двигателя: $I\text{н} = Ia + I\text{ш}$

32. Мощность машины.

$$\text{для генератора:}\ P\text{г} = U\text{г} \times I\text{н} \times 10^3 \text{квт.}$$
$$\text{для двигателя:}\ P\text{д} = U\text{дв} \times I\text{н} \times \eta \times 10^3 \text{квт.}$$

где: η – к. п. д. двигателя (η ≈ 0,6 ÷ 0,95) в зависимости от мощности машины. Значения к. п. д. можно брать в табл. 8.

33. Шаг обмоток по пазам и коллектору yп и yк.

$$y\text{п} = \frac{z}{2p} \quad \text{и} \quad y\text{к} = \frac{k \pm a}{p} \quad \text{для волновой обмотки}$$
$$y\text{к} = \pm 1 \quad \text{для простой петлевой обмотки}$$

34. Расчет уравнительных соединений на коллекторе (для петлевых обмоток).

а) шаг уравнительных соединений:

$$y\text{ур} = \frac{k}{p} = \frac{k}{a}$$

б) число коллекторных пластин, приходящихся на один паз kz:

$$kz = \frac{k}{z}$$

в) число коллекторных пластин, заключенных между двумя присоединенными уравнительными кольцами:

$$y'\text{ур} = \frac{2k}{z}$$

чередование номеров коллекторных пластин, присоединенных к уравнительным кольцам:

$$(y\text{ур} + 1) - (2 \times y\text{ур} + 1)$$

г) общее число эквипотенциальных колец:

$$n\text{эк} = \frac{k}{a \times y'\text{ур}}$$

д) площадь поперечного сечения уравнительного кольца:

$$s\text{ур} \approx 0{,}2 \div 0{,}5 \times s\text{м}$$

где: sм – площадь поперечного сечения ветви обмотки якоря, *мм*^{2}.
Размеры сечения уравнительного кольца sур = aур × bур подобрать по ГОСТ 436-41.
35. Подбор размеров коллектора в случае изготовления нового.
Коллекторное деление:

$$t\text{к} = \frac{\pi \times D\text{к}}{k} \quad \text{мм.}$$

где: tк ≥ 3,5 *мм*., tк = bиз + bк, b'к = 0,3 ÷ 1 *см*., b'к – толщина коллекторной пластины, bиз = 0,05 ÷ 0,12 *см*. – изоляция между пластинами (миканит). Для:

U ≤ 250 *в* bиз = 0,05 ÷ 0,08 *см*. U ≥ 250 *в* bиз = 0,08 ÷ 0,12 *см*.

откуда диаметр коллектора определится:

$$D\text{к} = \frac{k \times t\text{к}}{\pi}$$

длина коллектора найдется:

$$l\text{к} = n\text{щ} \times l\text{щ} + (n\text{щ} - 1) \times l\text{о} + d + e$$

где: nщ – число щеток на щеточном болте; lщ – длина щетки; lщ = 10 ÷ 30 *мм*. в машинах средней мощности; lо – осевое расстояние между смежными щетками; lо = 5 – 8 *мм*.; e и d – осевые расстояния между краями коллектора и ближайшими щетками; e = d = 4 – 5 *мм*.
36. Нагрев коллектора. При определении перегрева коллектора принимаем в расчет его боковую поверхность, перегрев коллектора:

$$\Delta t\text{к} = \frac{\text{C} \times (p\text{кр} + p\text{к.щ})}{s\text{к} \times (1 + 0{,}1 \times v\text{к})} \ \ {}^\circ\text{C}$$

где: C = 60 ÷ 150 (для машин с вентилятором на валу C ≤ 60); pкр – потери на трение щеток о коллектор, *вт*; pкр = 0,35 × sщ × vк; sщ –площадь щеток, *см*^{2}; vк – окружная скорость коллектора, *м/сек*. pк.щ = 1 ÷ 2 × I × ΔE – потери в промежуточном контакте (для угольных и графитовых щеток брать 2, для медно–графитовых 1); sк – боковая поверхность коллектора, *см*^{2}.

$$s\text{к} = \pi \times D\text{к} \times l\text{к}$$

Перегрев должен находиться в пределах Δtк° ≤ 65°C.
37. Расчет бандажа.
а) Выбор диаметра и материала бандажной проволоки: сталь или бронза, Ø 0,5 ÷ 1,5 *мм*., для стальной проволоки допускаемое напряжение на растяжение в бандаже Rz = 3000 ÷ 3500 *кг/см*^{2}, для бронзовой – Rz = 1800 ÷ 2000 *кг/см*^{2}.
б) угонное число оборотов якоря:

$$n\text{уг} = 1{,}2 \times n\text{ном} \ \ \text{об.мин.}$$

в) напряжение от собственной центробежной силы бандажа:

$$\sigma_1 = k\gamma \times D_1^2 \times \left(\frac{n\text{уг}}{1000}\right)^2 \ \ \text{кг/см}^2$$

где: σ_1 – напряжение от центробежной силы бандажа, *кг/см*^{2}; D_1 – диаметр бандажа, *см*. (D_1 = Da – наружному диаметру якоря); $k\gamma$ – коэффициент, учитывающий материал проволоки (для стальной $k\gamma$ = 0,022, для бронзовой $k\gamma$ = 0,024).

г) Веса отдельных участков обмотки вместе с изоляцией, удерживаемые бандажом.

Вес пазовой части обмотки:

$$G\text{п} = 9{,}35 \times z \times N\text{п} \times l'a \times s\text{м} \times 10^{-5}$$

где: 9,35 – удельный вес обмотки с изоляцией, *г/см*^{3}; z – число пазов якоря; Nn – число проводов в пазу; sм – площадь поперечного сечения эффективного проводника обмотки якоря, *мм*^{2}. $l'a$ – длина пазовой части обмотки с прямолинейным вылетом:

$$l'a = la + 2 \times 1 \div 1{,}5 \quad \text{см.}$$

Вес лобовой части со стороны, противоположной коллектору:

$$Gs = 9{,}35 \times z \times N\text{п} \times ls \times s\text{м} \times 10^{-5} + 8{,}9 \times n\text{эк} \times \pi \times D\text{ур.ср} \times s\text{м.ур} \times 10^{-5}$$

где: ls – длина витка лобовой части, *см*.

$$ls = k\text{р} \times \frac{\pi \times (D\text{а} - h\text{п})}{2p} - 2 \times 1 \div 1{,}5 \quad \text{см.}$$

nэк – число эквипотенциальных колец; Dур.ср – средний диаметр эквипотенциального кольца, *см*.; sм.ур – сечение уравнительного кольца, *мм*^{2}; 8,9 – удельный вес голой меди *г/см*^{3}.
Вес лобовой части со стороны коллектора:

$G\text{к} = G' + G\text{о}$ где: G' – вес обмотки лобовой части, *кг*.

$$G' = 9{,}35 \times z \times N\text{п} \times l's \times s\text{м} \times 10^{-5} \quad l's = k\text{р} \times \frac{\pi \times (D\text{а} - h\text{п})}{2p}$$

Gо – общий вес хомутиков, обмотки в хомутиках, изоляции и половины петушков; Gо составляет примерно 12% от веса всей обмотки:

$$G\text{о} \approx 0{,}12 \times G\text{м}, \quad G\text{м} = 9{,}35 \times z \times N\text{п} \times l\text{обм} \times s\text{м} \times 10^{-5}$$

$$l\text{обм} = l\text{а} + k\text{р} \times \frac{\pi \times (D\text{а} - h\text{п})}{2p}$$

д) число витков бандажа пазовой части:

$$w\text{п} = 1{,}13 \times \frac{G \times D_2}{d^2 \times (Rz - \sigma_1)} \times \left(\frac{n\text{уг}}{1000}\right)^2$$

где: d – диаметр проволоки, *см*.; $D_2 = Da - h$п – средний диаметр обмотки, *см*.; $\sigma_2 = R\text{z} - \sigma_1$ – напряжение в бандаже от центробежной силы обмотки, *кг/см*^{2} ($\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \leq R\text{z}$).
Полученное число витков для удобства размещения следует разбить на отдельные бандажи (2, 4 и т. д.). Если получающееся число витков трудно будет укладывать, то необходимо выбрать больший диаметр проволоки, не выступающий за поверхность канавки, и пересчитать вновь витки.

е) Число витков бандажа лобовой части, противоположной стороны коллектора:

$$w's = 1{,}13 \times \frac{Gs \times D'_2}{d^2 \times (Rz - \sigma_1)} \times \left(\frac{n\text{уг}}{1000}\right)^2$$

где: D_2 – средний диаметр обмотки лобовой части, *см.*:

$$D'_2 = (Da - h\text{п}) - 1 \div 1{,}5 \quad \text{см.}$$

ж) Общее число витков бандажа лобовой части со стороны коллектора:

$$w\text{к} = 1{,}13 \times \frac{G\text{к} \times D'_2}{d^2 \times (Rz - \sigma_1)} \times \left(\frac{n\text{уг}}{1000}\right)^2$$

з) Суммарное число витков якоря *w*:

$$w = w\text{п} + w's + w\text{к}$$

38. Проверка подшипников или цапфы на удельное давление:

$$p = \frac{RA}{lz \times dz}$$

где: *RA* – реакция опоры, *кг.*, *l*z – длина цапфы, *см.*, *d*z – диаметр цапфы, *см.*, *p* – удельное давление, *кг/см*^{2} (подшипники со смазкой допускают удельное давление до 25 *кг/см*^{2}.).

26. Пример приближенного расчета машины постоянного тока.

1. Данные для поверочного расчета машины без паспорта и обмоток:

а) номинальное напряжение *U* = 220 *в*.
б) номинальное число оборотов *n* = 800 *об. мин.* в режиме двигателя.
в) система возбуждения – шунтовая.
г) режим работы машины: двигатель – генератор.
д) число пазов якоря *z* = 36.
е) длина якоря *la* = 216 *мм*., включая два вентиляционных канала шириной по 8 *мм*.;
ж) длина коллектора *l*к = 125 *мм*.
з) внешний диаметр якоря *Da* = 240 *мм*.
и) диаметр коллектора *D*к = 175 *мм*.
к) число коллекторных пластин *k* = 107.
л) число главных и дополнительных полюсов 2*p* = 4 и 2*p*д = 2 (материал – сталь литье).
м) размеры паза *b*п.ср × *h*п = 6,5 × 33 *мм*^{2}.
н) размеры зубца *bz*мин = 3,1 *мм*. и *bz*макс = 14,5 *мм*.
о) высота спинки якоря *ha* = 59,5 *мм*.
п) высота спинки станины *hj* = 75 *мм*. (материал– чугун) и длина *lj* = 250 *мм*.
р) размеры главного полюса *lm* = 208 *мм*.; *bm* = 70 мм. и *hm* = 53 *мм*.; длина дуги *bl* = 132 *мм*.
с) размеры дополнительного полюса *l*д = 127 *мм*., *h*д = 52,5 *мм*.
*b*дмакс = 25,4 *мм*. и *b*д = 22,2 *мм*.
т) минимальный воздушный зазор между главным полюсом и якорем δ = 2 *мм*.

2. Зубцовое деление якоря по коронкам зубцов:

$$t = \frac{\pi \times D\text{а}}{z} = \frac{3{,}14 \times 24}{36} = 2{,}1 \quad \text{см.}$$

3. Полюсное деление:

$$\tau = \frac{\pi \times Da}{2p} = \frac{3{,}14 \times 24}{4} = 18{,}8 \quad \text{см.}$$

4. Сечение в воздушном зазоре:

$$sl = ai \times li \times \tau$$

где:

$$li = \frac{lm + \frac{la + l}{2}}{2} = \frac{20{,}8 + \frac{21{,}6 + 20}{2}}{2} = 20{,}8 \quad \text{см.}$$

$$l = la - ns \times bs = 216 - 2 \times 8 = 200 \quad \text{мм.} \quad ai = \frac{bl}{\tau} = \frac{13{,}2}{18{,}8} = 0{,}7$$

$$sl = ai \times li \times \tau = 0{,}7 \times 20{,}8 \times 18{,}8 = 275 \quad \text{см}^2$$

5. Максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре.
Выбираем по табл. 5 Bl = 6500 *гс*.
6. Магнитный поток машины при нагрузке:

$$\Phi\text{н} = Bl \times sl = 6500 \times 275 = 1{,}78 \times 10^6 \ \text{мкс}$$

7. Тип обмотки якоря. Берем простую волновую обмотку.
8. Число эффективных проводов в пазу якоря:

$$N\text{п} = \frac{E \times 60 \times a \times 10^8}{n \times z \times p \times \Phi\text{н}} = \frac{209 \times 60 \times 1 \times 10^8}{800 \times 36 \times 2 \times 1{,}78 \times 10^6} = 12{,}2$$

(округляем Nп = 12), где:

$$E = U\text{н} - \Delta U \ (\text{для двигателей}) \ \ \Delta U = \varepsilon \times U\text{н} = 0{,}05 \times 220 = 11 \quad \text{в}$$
$$\varepsilon = 5\% \quad \text{для } P = 10 \div 100 \quad \text{квт.} \quad E = 220 - 11 = 209 \quad \text{в}$$

9. Число секционных сторон:

$$S\text{п} = \frac{2 \times k}{z} = \frac{2 \times 107}{36} \approx 6$$

10. Число витков в секционной стороне:

$$W\text{п} = \frac{N\text{п}}{S\text{п}} = \frac{12}{6} = 2$$

11. Основная проверка коллектора.
а) Среднее напряжение между двумя соседними коллекторными пластинами:

$$U\text{ср} = \frac{U\text{н} \times 2p}{k} = \frac{220 \times 4}{107} = 8{,}25 \quad \text{в}$$

что вполне допустимо.
б) Окружная скорость коллектора:

$$v\text{к} = \frac{\pi \times D\text{к} \times n}{60} = \frac{3{,}14 \times 0{,}175 \times 800}{60} = 7{,}3 \ \text{м/сек.}$$

(допускается до 35 *м/сек.*).

12. Окружная скорость якоря:

$$va = \frac{\pi \times D\text{к} \times n}{60} = \frac{3{,}14 \times 0{,}24 \times 800}{60} = 10 \text{ м/сек.}$$

13. Находим поперечное сечение провода по коэффициенту заполнения паза:

$$s\text{м. из} = \frac{k\text{п} \times b\text{п. ср} \times h\text{п}}{N\text{п}} = \frac{0{,}4 \times 6{,}5 \times 33}{12} = 7{,}2 \quad \text{мм}^2$$

где задаемся kп ≈ 0,4 для U ≤ 500 *в*.
Так как сечение велико, то берем 2 параллельных провода, тогда элементарное сечение провода будет:

$$s\text{м. эл. из} = \frac{s\text{м. из}}{2} = \frac{7{,}2}{2} = 3{,}6 \quad \text{мм}^2$$

где:

$$s\text{м. эл. из} = 0{,}785 \times d_{\text{из}}^2 = 3{,}6 \quad \text{мм}^2$$

откуда:

$$d\text{из} = \sqrt{\frac{s\text{м. эл. из}}{0{,}785}} = \sqrt{\frac{3{,}6}{0{,}785}} = \sqrt{4{,}6} = 2{,}16 \quad \text{мм.}$$

Берем d = 1,81 ПБД (2 параллельных провода), так как dиз = 1,81 + 0,25 = 2,06 *мм.*, где 0,25 *мм.* – толщина изоляции на обе стороны проводника.
14. Подбираем плотность тока в обмотке якоря по табл. 4.

$$\Delta a = 5{,}8 \ \text{а/мм}^2$$

15. Находим ток в якоре:

$$Ia = ia \times 2a = 30 \times 2 = 60 \ a \qquad \text{(берем простую волновую обмотку)}$$

$$ia = s\text{м. эфф} \times \Delta a = 5{,}15 \times 5{,}8 = 30 \ a, \quad \text{где: } s\text{м. эфф} = 2 \times 1{,}82^2 \times 0{,}785 = 5{,}15 \quad \text{мм}^2$$

16. Линейная нагрузка якоря:

$$AS = \frac{ia \times N\text{п}}{t} = \frac{30 \times 12}{2{,}1} = 172 \ a/\text{см.}$$

17. Произведение $AS \times \Delta a$:

$$AS \times \Delta a = 172 \times 5{,}8 = 1000$$

18. Магнитный поток машины.
а) при холостом ходе Фо:

$$\text{Фо} = \frac{U\text{н} \times 60 \times a \times 10^8}{n \times z \times N\text{п} \times p} = \frac{220 \times 60 \times 1 \times 10^8}{800 \times 36 \times 12 \times 2} = 1{,}9 \times 10^6 \quad \text{мкс}$$

б) при нагрузке:

$$\text{Фн} = \frac{E \times 60 \times a \times 10^8}{n \times z \times N\text{п} \times p} = \frac{209 \times 60 \times 1 \times 10^8}{800 \times 36 \times 12 \times 2} = 1{,}81 \times 10^6 \quad \text{мкс}$$

19. Число оборотов двигателя при холостом ходе.

$$n\text{о} = \frac{U\text{н}}{\left(\frac{p}{a} \times \frac{10^{-8}}{60} \times z \times N\text{п}\right) \times \text{Фн}} = \frac{220}{\left(\frac{2}{1} \times \frac{10^{-8}}{60} \times 36 \times 12\right) \times 1{,}81 \times 10^6} = 845 \ \text{об. мин.}$$

20. Максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре.
а) при холостом ходе:

$$Bl\text{о} = \frac{\Phi\text{о}}{sl} = \frac{1{,}9 \times 10^6}{275} = 6900 \quad \text{гс}$$

б) при нагрузке:

$$Bl = \frac{\Phi\text{н}}{sl} = \frac{1{,}81 \times 10^6}{275} = 6600 \quad \text{гс}$$

21. Максимальная индукция в спинке якоря при нагрузке.

$$Ba = \frac{\Phi\text{н}}{2sa} = \frac{1{,}81 \times 10^6}{226} = 8000 \quad \text{гс}$$

$$2sa = 2 \times k\text{с}m \times ha \times l = 2 \times 0{,}95 \times 5{,}95 \times 20 = 226 \quad \text{см}^2$$

22. Магнитные индукции в зубце якоря при нагрузке.
а)

$$Bz\text{макс} = \frac{Bl \times t \times li}{bz\text{мин} \times k\text{ст} \times l} = \frac{6600 \times 2{,}1 \times 20{,}8}{0{,}87 \times 0{,}95 \times 20} = 17500 \quad \text{гс}$$

$$bz\text{мин} = \frac{\pi \times (Da - 2 \times h\text{п})}{z} - b\text{п} = \frac{3{,}14 \times (24 - 2 \times 3{,}3)}{36} - 0{,}65 = 1{,}52 - 0{,}65 = 0{,}87 \quad \text{см.}$$

б)

$$Bz\text{мин} = Bz\text{макс} \times \frac{bz\text{мин}}{bz\text{макс}} = 17500 \times \frac{0{,}87}{1{,}45} = 10500 \quad \text{гс}$$

в)

$$Bz\text{ср} = Bz\text{макс} \times \frac{bz\text{мин}}{bz\text{мср}} = 17500 \times \frac{0{,}87}{1{,}16} = 13200 \quad \text{гс}$$

где:

$$bz\text{ср} = \frac{0{,}87 + 1{,}45}{2} = 1{,}16 \quad \text{см.}$$

23. Магнитная индукция в главном полюсе при нагрузке:

$$Bm = \frac{\Phi m}{sm} = \frac{2 \times 10^6}{145} = 13800 \quad \text{гс}$$

допускается до 17000 *гс*.

Магнитный поток Φm определяем по формуле:

$$\Phi m = \sigma m \times \Phi\text{н} = 1{,}1 \times 1{,}81 \times 10^6 = 2 \times 10^6 \ \text{мкс}$$

находим сечение:

$$sm = bm \times lm = 7{,}0 \times 20{,}8 = 145 \quad \text{мм}^2$$

24. Магнитная индукция в спинке станины:

$$Bj = \frac{\Phi m}{2 \times sj} = \frac{2 \times 10^6}{375} = 5350 \quad \text{гс}$$

для чугуна Bj допускается до 8000 *гс*.

$$2 \times sj = 2 \times lj \times hj = 2 \times 25 \times 7{,}5 = 375 \quad \text{см}^2$$

25. Магнитная индукция в дополнительном полюсе. Задаемся Bд = 7000 *гс*, магнитный поток в дополнительном полюсе:

$$Ф\text{д} = B\text{д} \times s\text{д} = 7000 \times 28{,}2 = 0{,}2 \times 10^6 \ \text{мкс}$$

Bд допускается от 6000 до 8000 *гс*.

$$s\text{д} = l\text{д} \times b\text{д} = 12{,}7 \times 2{,}22 = 28{,}2 \quad \text{см}^2$$

26. Число витков на полюс и площадь поперечного сечения обмотки дополнительных: полюсов:

$$W\text{д} = \frac{AW\text{д}}{Ia} = \frac{1940}{60} \approx 32$$

$$AW\text{д} \approx 1{,}2 \times AW\text{р. я} = 0{,}6 \times \tau \times AS = 0{,}6 \times 18{,}8 \times 172 = 1940$$

площадь попречного сечения:

$$s\text{м. д} = \frac{Ia}{\Delta\text{д}} = \frac{60}{2{,}7} = 22{,}3 \quad \text{мм}^2$$

задаемся Δд = 2,7 *а/мм*^{2} по таблице 4. Берем ∅ 3,8 *мм*. ПБД в 2 параллельных провода.
27. Коэффициент воздушного зазора:

$$k\text{с} = \frac{t + 10 \times \delta}{bz + 10 \times \delta} = \frac{2{,}1 + 10 \times 0{,}2}{1{,}45 + 10 \times 0{,}2} = \frac{4{,}1}{3{,}45} = 1{,}18 \quad \text{где: } bz = t - b\text{прор} = 2{,}1 - 0{,}65 = 1{,}45 \text{ см.}$$

28. Суммарные ампервитки машины на полюс при нагрузке:

$$\Sigma AW = AWl + AWz + AWa + AWm + AW'l + AWd$$
$$= 1250 + 104 + 11{,}5 + 90 + 110 + 29 + 260 \approx 1845$$

где находим:
а) ампервитки на полюс в воздушном зазоре:

$$AWl = 0{,}8 \times 1{,}18 \times 0{,}2 \times 6600 = 1250$$

б) ампервитки зубца якоря:

$$AWz = h\text{п} \times \left(\frac{awz\text{макс} + awz\text{мин} + 4 \times awz\text{ср}}{6}\right) = 3{,}3 \times \left(\frac{110 + 6{,}3 + 4 \times 13{,}2}{6}\right)$$
$$= 3{,}3 \times \frac{171}{6} = 94$$

по табл. 10 находим удельные ампервитки $awz = f \times Bz$.
в) ампервитки на полюс спинки якоря:

$$AWa = awa \times La \times \gamma a = 4 \times 4{,}5 \times 0{,}637 = 11{,}5 \ \text{ где: } \gamma a = f \times Ba = f \times 8000 \text{ гс} = 0{,}637$$

по кривой на рис. 71.

$$La = \frac{\pi \times (Da - 2 \times hz - ha)}{4p} = \frac{3{,}14 \times (24 - 2 \times 3{,}3 - 5{,}95)}{4 \times 2} = \frac{3{,}14 \times 11{,}45}{8} = 4{,}5 \quad \text{см.}$$

$$awa = f \times Ba = f \times 8000 \text{ гс} = 4 \quad \text{по таблице 10.}$$

г) ампервитки в главном полюсе:

$$AWm = awm \times hm = 17 \times 5{,}3 = 90 \quad \text{где: } awm = f \times Bm = f \times 13800 \text{ гс} = 17 \text{ по табл. } 10.$$

д) ампервитки в стыке полюса:

$$AW'l = 0{,}8 \times Bm \times \delta' m = 0{,}8 \times 13800 \times 0{,}01 = 110$$

е) ампервитки в спинке станины:

$$AWj = awj \times Lj \times \gamma j = 2{,}7 \times 17 \times 0{,}637 = 29$$
$$\text{где: } awj = f \times Bj = f \times 5360 \text{ гс} = 2{,}7 \text{ по табл. } 11.$$

$$\gamma j = f \times Bj = f \times 5360 \text{ гс} = 0{,}637$$

по кривой рис. 71.

$$Lj = \frac{\pi \times (Da + 2 \times \delta + 2 \times hp + hj)}{4p} = \frac{3{,}14 \times (24 + 2 \times 0{,}2 + 2 \times 5{,}3 + 7{,}5)}{4 \times 2} \approx 17 \text{ см.}$$

ж) ампервитки реакции якоря по продольной оси на полюс:

$$AWd = (0{,}06 \div 0{,}1) \times \tau \times AS$$

$$AWd = 0{,}08 \times \tau \times AS = 0{,}08 \times 18{,}8 \times 172 = 260$$

29. Число витков на полюс и площадь поперечного сечения шунтовой обмотки.
а) число витков на полюс:

$$W\text{ш} = \frac{\Sigma AW}{I\text{ш}} = \frac{1845}{1{,}9} \approx 980 \quad \text{где: } I\text{ш} = (1{,}2 \div 10\%) \times I\text{н}$$

Берем Iш = 3,2 %. Iн = 0,032 × 60 = 1,9 *а*, в табл. 11 по приблизительно намеченной мощности P = Uн × Iн ×η = 220 ×60 × 0,83 = 11,0 *квт.*, задаваясь η = 0,83 по табл. 8;
б) площадь поперечного сечения шунта:

$$s\text{ш} = \frac{I\text{ш}}{\Delta\text{ш}} = \frac{1{,}9}{3{,}5} = 0{,}54 \text{ мм}^2$$

задаемся Δш = 3,5 *а/мм*^{2} по табл. 4. Берем ∅ 0,83 ПБО в 1 параллельный провод, соединяем катушки между собой последовательно.
Проверяем:

$$s\text{ш} = \frac{(1{,}1 \div 1{,}2) \times kt \times 2p \times \Sigma AW \times l\text{ш}}{5700 \times U\text{н}}$$

$$l\text{ш} = 2 \times (l\text{ш} + b\text{к}) + 2 \times (bm + b\text{к}) = 2 \times (20{,}8 + 3) + 2 \times (7 + 3) = 2 \times 23{,}8 + 2 \times 10 = 67{,}6 \approx 68 \text{ см.}$$

задаемся:

$$b\text{к} = 30 \text{ мм.} \quad (\text{обычно } b\text{к} = 2 \div 6 \text{ см.})$$

$$s\text{ш} = \frac{1{,}1 \times 1{,}26 \times 1845 \times 68 \times 4}{5700 \times 220} = 0{,}56 \text{ мм}^2$$

что близко к расчетному сечению.

Сопротивление шунтовой обмотки:

$$r\text{ш} = \frac{kt \times 2p \times W\text{ш} \times l\text{ш}}{5700 \times s\text{ш}} = \frac{1{,}26 \times 4 \times 980 \times 68}{5700 \times 0{,}54} = 108 \quad \text{ом.}$$

окончательно ток в шунтовой обмотке найден:

$$I\text{ш} = \frac{U}{r\text{ш}} = \frac{220}{108} \approx 2 \quad a$$

Проверка на заполнение обмоткой пространства между полюсами:

$$s\delta \geq 2 \times h\text{к} \times b\text{к} = 2 \times 2{,}5 \times 3 = 15 \quad \text{см}^2$$

$$h\text{к} = \frac{AW\text{ш}}{100 \times \Delta\text{ш} \times k\text{в} \times b\text{к}} = \frac{1845}{100 \times 3{,}7 \times 0{,}67 \times 3} = 2{,}5 \quad \text{см.}$$

$$k\text{в} \approx 0{,}8 \times \left(\frac{d}{d_1}\right)^2 = 0{,}8 \times \left(\frac{1{,}16}{1{,}27}\right)^2 = 0{,}67$$

$$s\delta \approx \frac{\tau\text{мин} + \tau\text{макс} - 2 \times (bm + 2 \times b\text{к})}{2} \times hm = \frac{27{,}2 + 18{,}8 - 2 \times (7 + 23)}{2} \times 5{,}3 \approx 53 \quad \text{см}^2$$

$$\tau\text{мин} = \tau = 18{,}8 \quad \text{см.}$$

$$\tau\text{макс} = \frac{\pi \times (Da + 2 \times hm)}{2p} = \frac{3{,}14 \times (24 + 2 \times 5{,}3)}{4} = 27{,}2 \quad \text{см.}$$

откуда $s\delta = 53 > 15$ $см^2$, что допустимо с большим запасом.
30. Номинальный ток машины.
Ток якоря:

$$Ia = I\text{н} \pm I\text{ш}$$
$$I\text{н} = Ia - I\text{ш} = 60 - 2 = 58 \quad a \text{ для генератора}$$
$$I\text{н} = Ia + I\text{ш} = 60 + 2 = 62 \quad a \text{ для двигателя}$$

31. Мощность машины:

$$P\text{г} = U\text{н} \times I\text{н} = 230 \times 58 \approx 13 \text{ квт. для генератора}$$
$$\text{Рдв} = U\text{н} \times I\text{н} \times \eta = 220 \times 62 \times 0{,}83 \approx 11 \text{ квт. для двигателя}$$

32. Число оборотов машины в режиме генератора:

$$n\text{г} = (1{,}05 \div 1{,}1) \times n\text{д} \times \left(\frac{U\text{г} + U\Delta}{U\text{дв} - \Delta U}\right) = 1{,}05 \times 800 \times \left(\frac{230 + 10}{220 - 10}\right) = 960 \text{ об. мин.}$$

$$n\text{г} = 960 \quad \text{об. мин.}$$

33. Шаги обмоток по пазам и коллектору:

$$y\text{п} = \frac{z}{2p} = \frac{36}{4} = 9 \quad (1 - 10) \qquad y\text{к} = \frac{k \pm a}{p} = \frac{107 - 1}{2} = 53 \quad (1 - 54)$$

34. Нагрев коллектора:

$$\Delta t°\text{к} = \frac{\text{C} \times (p\text{кр} + p\text{к.щ})}{s\text{к} \times (1 + 0{,}1 \times v\text{к})} = \frac{100}{690} \times \frac{18 + 248}{1 + 0{,}1 \times 7{,}3} = \frac{100 \times 264}{690 \times 1{,}73} = 22°\text{C} \leq 65°\text{C}$$

$$(\text{C} = 60 \div 150)$$

Потери на трение щеток о коллектор:

$$p\text{кр} = 0{,}35 \times s\text{щ} \times v\text{к} = 0{,}65 \times 7{,}2 \times 73 = 18 \ \text{вт}$$

$$s\text{щ} = 2 \times 1{,}2 \times 3 = 7{,}2 \ \text{см}^2 \quad \Delta\text{щ} = \frac{I\text{щ}}{s\text{щ}} = \frac{30}{7{,}2} = 4{,}2 \ \text{а/см}^2$$

(плотность тока нормальна даже для твердых щеток)

$$I\text{щ} = \frac{Ia}{p} = \frac{60}{2} = 30 \ a$$

Потери в промежуточном контакте:

$$p\text{к.щ} = 2 \times I \times \Delta E = 2 \times 62 \times 2 = 248 \ \text{вт}$$
$$s\text{к} = \pi \times D\text{к} \times l\text{к} = 3{,}14 \times 17 \times 12{,}5 = 690 \ \text{см}^2 \ (\Delta E = 2 \text{ в до } 440 \text{ в})$$

35. Расчет бандажа.
а) берем материал бандажной проволоки; сталь Ø 0,5 *мм*.
б) угонное число оборотов:

$$n\text{уг} = 1{,}2 \times n\text{н.ген} = 1{,}2 \times 960 = 1150 \text{ об.мин.}$$

в) Напряжение от собственной центробежной силы бандажа:

$$\sigma_1 = k\gamma \times D_1^2 \times \left(\frac{n\text{угон}}{1000}\right)^2 = 0{,}022 \times 24^2 \times \left(\frac{1150}{1000}\right)^2 \approx 17 \ \text{кг/см}^2$$

$D_1 \approx Da$ = 240 *мм.*, k = 0,022 для стальной проволоки.
г) Веса отдельных участков обмотки вместе с изоляцией, удерживаемые бандажом. Вес для пазовой части обмотки:

$$G\text{п} = 9{,}35 \times z \times N\text{п} \times l'a \times s\text{м} \times 10^{-5} = 9{,}35 \times 36 \times 12 \times 21{,}9 \times 6 \times 10^{-5} \approx 5{,}3 \ \text{кг}$$

$$s\text{м} = 2 \times 0{,}785 \times 1{,}95^2 = 6 \ \text{мм}^2$$

$$l'a = la + 2 \times (1 \div 1{,}5) = 216 + 2 \times 1{,}5 = 219 \text{ мм} = 21{,}9 \ \text{см.}$$

Вес лобовой части со стороны, противоположной коллектору:

$$Gs = 9{,}35 \times z \times N\text{п} \times ls \times s\text{м} \times 10^{-5} = 9{,}35 \times 36 \times 12 \times 21{,}5 \times 6 \times 10^{-5} = 5{,}2 \ \text{кг.}$$

$$ls \approx k\text{р} \times \frac{\pi \times (Da - h\text{п})}{2p} - 2 \times (1 \div 1{,}5) \text{ см.} = 1{,}5 \times \frac{3{,}14 \times (24 - 3{,}3)}{4} - 2 \times 1{,}5 = 21{,}5 \ \text{см.}$$

Вес лобовой части со стороны коллектора:

$$G\text{к} = G' + G\text{о} = 5{,}9 + 1{,}3 = 7{,}2 \quad \text{кг.}$$

$$G' = 9{,}35 \times z \times N\text{п} \times l's \times s\text{м} \times 10^{-5} = 9{,}35 \times 36 \times 12 \times 24{,}5 \times 6 \times 10^{-5} = 5{,}9 \quad \text{кг}$$

$$l's = \frac{\pi \times (Da - h\text{п})}{2p} = 1{,}5 \times \frac{3{,}14 \times (24 - 3{,}3)}{4} = 24{,}5 \quad \text{см.}$$

$$G\text{о} = 0{,}12 \times G\text{м} = 0{,}12 \times 11{,}1 \approx 1{,}3 \quad \text{кг.}$$

$$G\text{м} = 9{,}35 \times z \times N\text{п} \times l\text{обм} \times s\text{м} \times 10^{-5} = 9{,}35 \times 36 \times 12 \times 46{,}1 \times 6 \times 10^{-5} = 11{,}1 \quad \text{кг.}$$

$$l\text{обм} = la + k\text{р} \times \frac{\pi \times (Da - h\text{п})}{2p} = 21{,}6 + 1{,}5 \times \frac{3{,}14 \times (24 - 3{,}3)}{4} = 21{,}6 + 24{,}5 = 46{,}1 \quad \text{см.}$$

д) число витков бандажа пазовой части:

$$w\text{п} = 1{,}13 \times \frac{G\text{п} \times D_2}{d^2 \times (Rz - \sigma_1)} \times \left(\frac{n\text{уг}}{1000}\right)^2 = 1{,}13 \times \frac{5{,}3 \times 20{,}7}{0{,}05^2 \times (3000 - 17)} \times \left(\frac{1150}{1000}\right)^2 \approx 22$$

$$D_2 = Da - h\text{п} = 24 - 3{,}3 = 20{,}7 \quad \text{см.}$$

Берем Rz = 3000 *кг/см*² (допускаемое напряжение растяжения в бандаже для стальной проволоки). Для удобства размещения разбиваем число витков на два отдельных бандажа $w\text{п}/2$ = 22/2= 11 витков.

е) окружная скорость якоря при угонных числах оборотов:

$$va\text{уг} = \frac{\pi \times Da \times n\text{уг}}{60} = \frac{3{,}14 \times 0{,}24 \times 1150}{60} = 14{,}5 \text{ м/сек.}$$

что вполне допустимо.

ж) число витков бандажа лобовой части, противоположной стороны коллектора:

$$w's = 1{,}13 \times \frac{Gs \times D'_2}{d^2 \times (Rz - \sigma_1)} \times \left(\frac{n\text{уг}}{1000}\right)^2 = 1{,}13 \times \frac{5{,}2 \times 20{,}7}{0{,}05^2 \times (3000 - 17)} \times \left(\frac{1150}{1000}\right)^2 \approx 22$$

з) общее число витков бандажа лобовой части со стороны коллектора:

$$w\text{к} = 1{,}13 \times \frac{G\text{к} \times D'_2}{d^2 \times (Rz - \sigma_1)} \times \left(\frac{n\text{уг}}{1000}\right)^2 = 1{,}13 \times \frac{7{,}2 \times 19{,}2}{0{,}05^2 \times (3000 - 17)} \times \left(\frac{1150}{1000}\right)^2 \approx 28$$

$$D'_2 = D_2 - (1 \div 1{,}5) = 20{,}7 - 1{,}5 = 19{,}2 \quad \text{см.}$$

и) суммарное число витков:

$$w = w\text{п} + w's + w\text{к} = 22 + 22 + 28 = 72$$

Глава третья
Обмотки машин переменного тока.
27. Классификация обмоток.

Обмотки машин переменного тока можно подразделить на три основные группы по следующим признакам:

1) по способу заполнения пазов – однослойные и двухслойные;

2) по конструктивным исполнениям – двухярусные, трехярусные, шаблонные, стержневые и короткозамкнутые:

3) по числу фаз – однофазные, двухфазные, трехфазные и т. д.

Однослойные обмотки могут быть выполнены либо вручную отдельными катушками (катушечными группами), либо секциями ("мягкими" и "жесткими" – шаблонами). Двухслойные обмотки с укорочением шага по пазам выполняются в два слоя готовыми секциями и по способу укладки в пазы разделяются на: а) обмотки с "мягкими" (всыпными секциями) и б) обмотки с "жесткими" секциями (шаблонами).

Короткозамкнутая обмотка ("беличья" клетка) устраивается на роторе асинхронного двигателя и в полюсах индуктора синхронной машины. Простая "беличья" клетка состоит из стержней либо круглого сечения, либо прямоугольного и двух колец (рис. 31). Для глубоких пазов стержни изготовляются узкими и высокими. Короткозамкнутый ротор машин до 100 *квт*. часто выполняют заливкой алюминием.

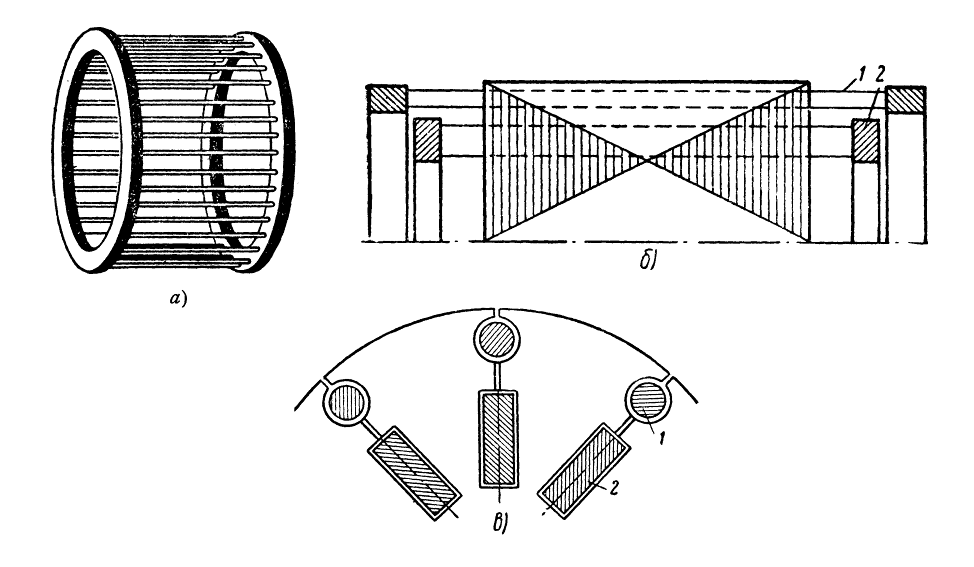


Рис. 31. Беличья клетка.
а – одинарная клетка; б и в – двойная клетка.
1 – наружная пусковая клетка; 2 – внутренняя рабочая клетка.

28. Однослойные "катушечные" (концентрические) обмотки.

Катушечная обмотка выполняется в виде отдельных элементарных катушек разной ширины, которые последовательно соединяются между собой и образуют катушечные группы. Катушечная группа состоит из последовательно соединенных двух, трех и т. д. катушек. Число таких последовательно соединенных катушек или сторон катушек характеризует число пазов на полюс и фазу (q), и чем больше q тем больше ступеней и ближе форма поля к синусоиде (рис. 32, 2).

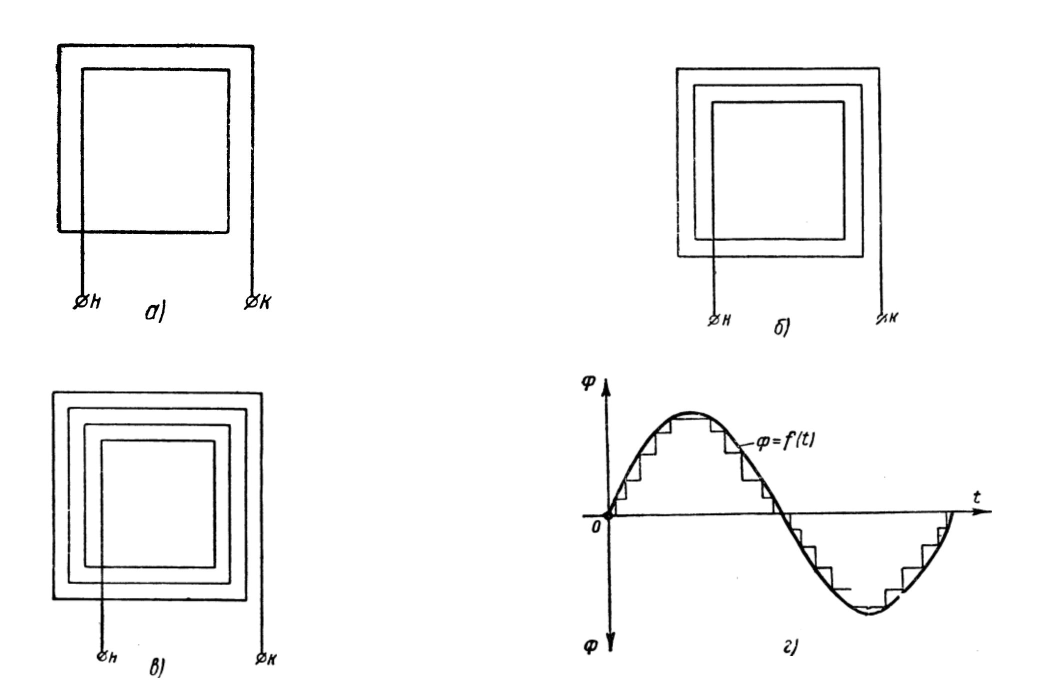


Рис. 32. Катушечные группы
однослойной обмотки при различных числах пазов на полюс и фазу.
а) q = 2; б) q = 3; в) q = 4; г – кривая поля фазы (чем больше q, тем больше ступеней).

Проводники катушечных обмоток в зависимости от формы паза могут вкладываться в пазы через прорези (полузакрытый паз) или просовываться с торца ротора (закрытый паз). Последний способ носит название обмотки "в протяжку". Катушечные группы схематично показаны на рис. 32, а, б, в. Число катушечных групп находим по формуле:

$$n\text{к} = m \times p$$

где: nк–число катушечных групп; m – число фаз; p – число пар полюсов.
Число пазов между внутренними сторонами катушки:

$$n\text{п} = \frac{z}{n\text{к}} = 2q$$

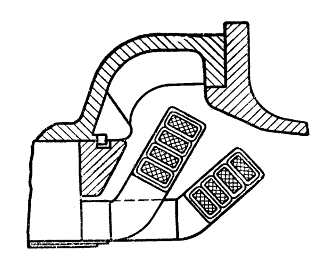
В трехфазной системе катушка одной фазы отстоит от катушки другой фазы на 120 электрических градусов, т. е. на ⅓ двухполюсного деления или на ⅔ ширины катушки.
Число пазов:

$$z = 2p \times m \times q$$

откуда число пазов на полюс:

$$q = \frac{z}{2pm}$$

Простые катушечные обмотки могут быть применены как в статоре, так и в роторе асинхронных двигателей, особенно малой мощности.
Лобовые части катушечных обмоток могут располагаться в два или в три яруса (рис. 33). Отсюда обмотки получили названия двухъярусных (двухплоскостных) и трехъярусных (трехплоскостных).
Максимальное число параллельных ветвей обмотки равно числу пар полюсов, т. е. aмакс = 2p. При нечетном числе пар полюсов катушечные группы нельзя выполнить в две параллельные ветви. Кроме того, в двухъярусных обмотках у одной из катушек лобовую часть приходится делать перекошенной ("косая" катушка), так как одна сторона ее выходит из короткой катушки, а другая – из длинной.



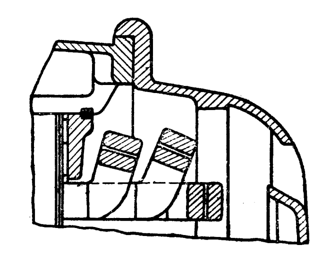


Рис. 33. Формы лобовых частей однослойных обмоток.
а – двухъярусная обмотка; б – трехъярусная обмотка.

Катушечные группы можно разделить на полугруппы из двух концентрических катушек, называемых полукатушками. Если число пазов на полюс и фазу четное, то обе полукатушки получаются одинаковыми. Такие обмотки носят название обмоток "вразвалку".

29. Соединение фаз трехфазной обмотки.

В трехфазных машинах применяются два основных соединения фаз: в "звезду" (Y) и в "треугольник" (△) (рис. 34). Соединение фаз производится на доске зажимов (рис. 35). При соединении фаз в звезду $I\text{ф}_Y = I\text{л}$, а фазное напряжение в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного:

$$U\text{ф}_Y = \frac{U\text{л}}{\sqrt{3}}$$

При соединении в треугольник:

$$I\text{ф} = \frac{I\text{л}}{\sqrt{3}}, \text{ а } U\text{ф}_\triangle = U\text{л} \quad (\text{рис. } 36)$$

Для большей наглядности эти соотношения приведены в форме таблицы (табл. 12). Один и тот же асинхронный двигатель может работать от сети с напряжением 380 *в* при соединении фаз в звезду и от сети 220 *в* ври соединении фаз в треугольник.

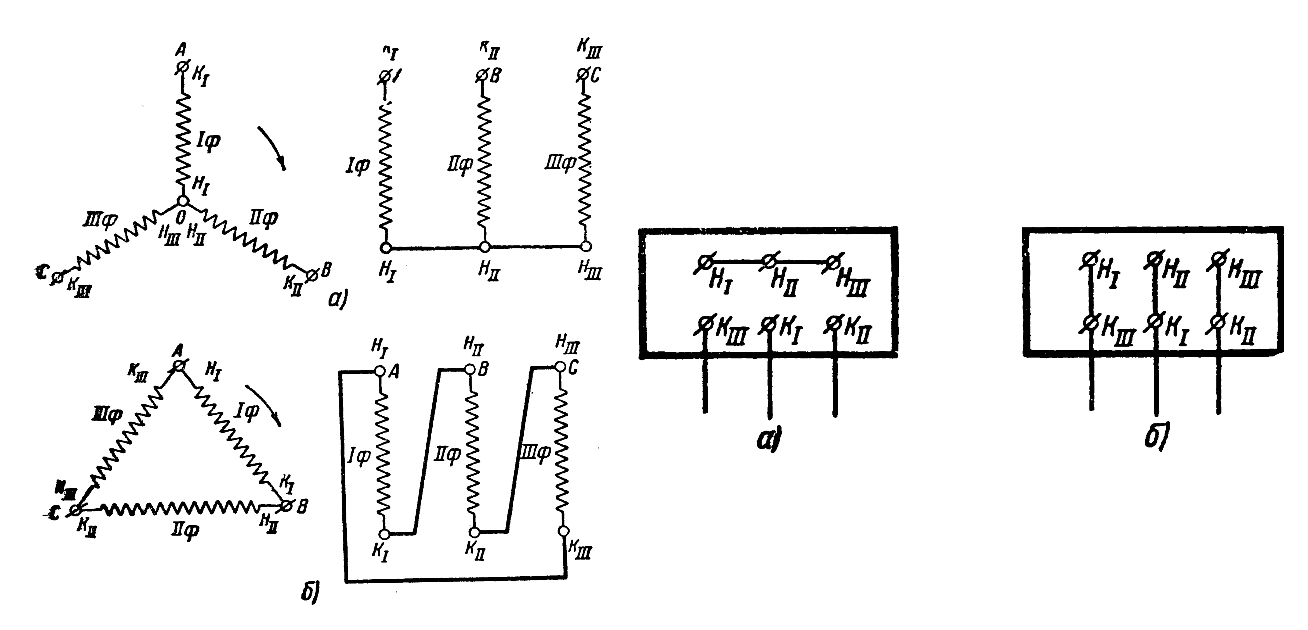
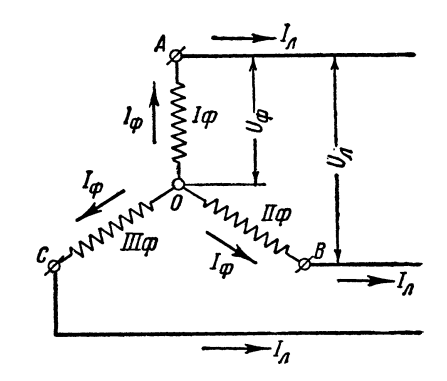


Рис. 34. Соединений фаз трехфазной обмотки.
а – в "звезду", б – в "треугольник".

Рис. 35. Схема доски зажимов машины трехфазного тока.



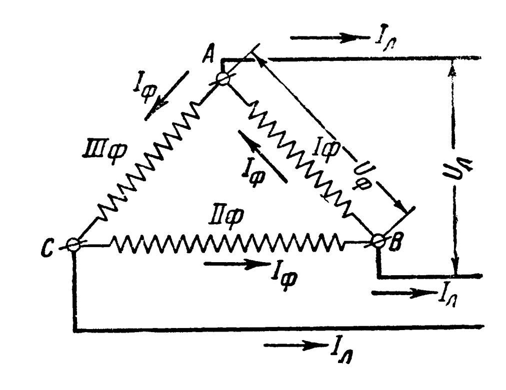


Рис. 36. Фазные и линейные токи и напряжения.

Таблица 12.

Соединение фаз	"звезда" Y	"треугольник" △
Сила тока	$I\text{л} = I\text{ф}$	$I\text{л} = \sqrt{3} \times I\text{ф}$
Напряжение	$U\text{л} = \sqrt{3} \times U\text{ф}$	$U\text{л} = U\text{ф}$

30. Однофазные катушечные обмотки.

Однофазные обмотки выполняются "вразвалку" и на практике встречаются в статорах асинхронных двигателей малой мощности. Начало обмотки берут извне катушки. Для того чтобы намотать однофазную обмотку, необходимо увеличить вдвое фазную зону по сравнению с зоной трехфазной обмотки, т. е. обмотку распределить на зоне ⅔ от полюсного деления или 120 электрических градусов. Однофазная обмотка заполняет ⅔ пазов, а ⅓ пазов статора останутся неиспользованными. В них вкладывается пусковая обмотка, которая позволяет осуществить во время пуска двухфазное вращающееся поле, иначе мы получили бы пульсирующее поле и двигатель не пошел бы в ход. Для создания пускового двухфазного поля необходимо не только расположить вспомогательную обмотку под углом в 90 электрических градусов к главной (рабочей), но и сдвинуть в ней ток по фазе на 90°. Последнее достигается за счет большого индуктивного сопротивления пусковой обмотки или включением дополнительного реактивного сопротивления. Во время пуска вспомогательная обмотка приключается к рабочей параллельно и после того, как двигатель развернется, выключается. Число необмотанных пазов между сторонами рабочей и пусковой обмоток выбирается:

$$n\text{п}(\text{р}) = 2q\text{п} \quad \text{и} \quad n\text{п}(\text{п}) = 2q\text{р}$$

Порядок следования катушек обмоток следующий:

$$1\text{р} - 1\text{п} - 2\text{р} - 2\text{п} \quad \text{и т. д. (рис. 37)}$$

Однофазные двигатели малой мощности применяются для приводов бытовых нужд (вентиляторы, холодильники), а двигатели средней мощности – для приводов промышленных, требующих малого пускового момента. Недостатки однофазного двигателя по сравнению с трехфазным следующие:

1) необходимость специальных пусковых устройств;

2) ток холостого хода примерно в $\sqrt{3}$ раз больше, а ток короткого замыкания в $\sqrt{3}/2$ раз меньше, чем у трехфазного;

3) максимальный момент (перегрузочный) приблизительно вдвое ниже, а cos φ хуже, чем у трехфазного;

4) при одинаковых с трехфазным двигателем габаритах мощность однофазного двигателя равна примерно 70% мощности трехфазного, а потери выше, чем в трехфазном (к. п. д. ниже примерно на 1 %, а $\cos\varphi$ – на 10 %). В настоящее время появились однофазные индукционные двигатели малой и средней мощности с высокими пусковыми и рабочими характеристиками.

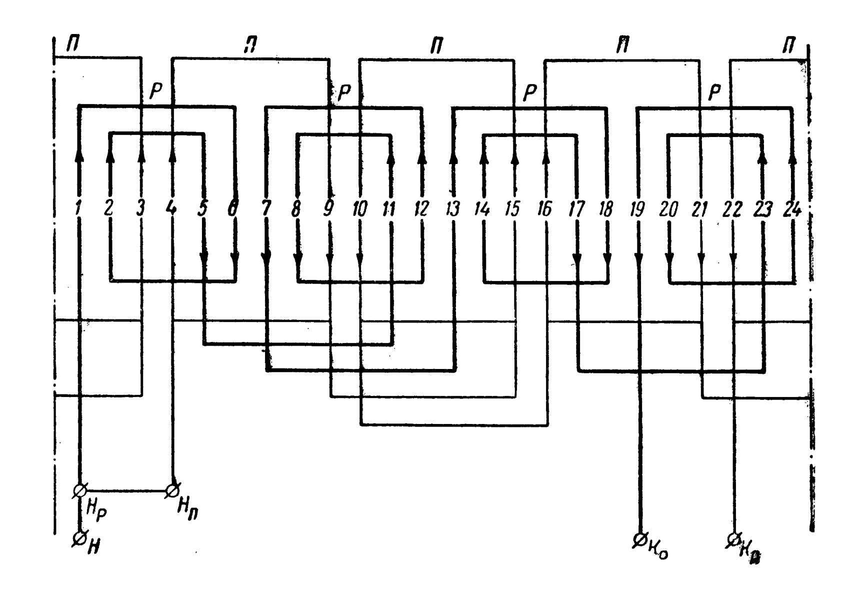


Рис. 37. Схемы рабочей и пусковой обмоток однофазного асинхронного двигателя.

31. Однослойные секционные обмотки.

Однослойные трехфазные секционные обмотки являются симметричными и выполняются в виде отдельных секций – шаблонов. Эти обмотки подразделяются на следующие:

1) простые шаблонные, не применяющиеся на практике из–за конструктивных затруднений.
2) обмотки шаблонные "вразвалку".
3) цепные обмотки.

Все перечисленные обмотки имеют секции одинаковых размеров и формы и при любом числе полюсов их фазы имеют одинаковые активные и индуктивные сопротивления. Схемы секционных обмоток даны на рис. 38, 39 и 40.
В простой катушечной обмотке и в простой шаблонной q начал чередуются с q концами, а в обмотках "вразвалку" как катушечной, так и шаблонной $q/2$ начал чередуются с $q/2$ – концами, если q – четное число и $(q–1)/2$ начал $(q–1)/2+1$ с концами при q – не четном числе. В шаблонных обмотках "вразвалку" все катушки мотаются в одну и ту же сторону, обычно в правую, т. е. по часовой стрелке. С левой стороны секции берут начало, с правой – конец. При q = 4 каждая катушечная группа состоит из двух элементарных катушек. В некоторых однослойных секционных обмотках одно начало чередуется с одним концом. Эти обмотки получили название "цепные”. Шаг по пазам цепной обмотки yп = $z/2p$ должен всегда являться числом нечетным, так как при четном шаге обмотка невыполнима. Число катушек однослойной секционной обмотки равно половине числа пазов:

$$n\text{к. с} = \frac{z}{2}$$

Отношение числа катушек секционной обмотки к числу катушечных групп концентрической обмотки должно выражаться четным числом:

$$\frac{n\text{к. с}}{n\text{к}} = 2, 4, 8 \quad \text{и т. д.}$$

Если это отношение выражается нечетным числом, то следует перейти к намотке однослойной обмотки с двойными или чередующимися шагами.

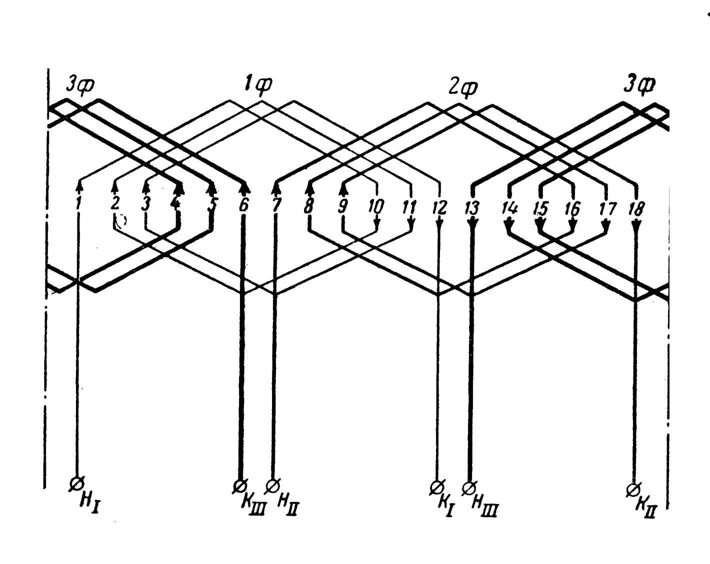


Рис. 38. Схема однослойной простой шаблонной обмотки.

Рис. 39. Схема однослойной шаблонной обмотки "вразвалку".

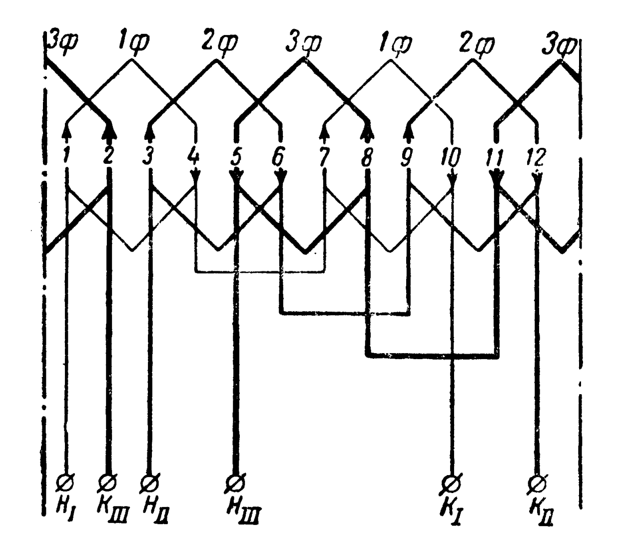


Рис. 40. Схема однослойной цепной обмотки.

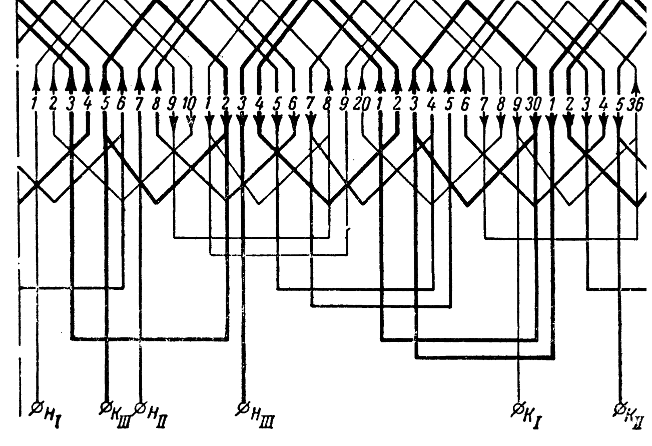


Рис. 41. Схема однослойной секционной обмотки с чередующимися шагами.

32. Однослойные секционные обмотки с двойными или чередующимися шагами.

Однослойные секционные обмотки с двойными или чередующимися шагами–это одна из разновидностей секционных обмоток. Они составляются из двойных последовательно соединенных секций или из двойных и одиночных секций, а следовательно имеют два шага по пазам. Один шаг по пазам является нормальным, другой – укороченным, или один шаг укороченным, другой – удлиненным, или один – нормальным, а другой – удлиненным. В практике эти обмотки получили название катушечно–секционных.

Эти обмотки удобны в смысле уменьшения числа паек, но рассеяние в лобовых частях будет повышенным по сравнению с цепными. Они выполнимы и при дробном числе пазов на полюс и фазу. Эти обмотки особенно удобны при числе катушечных групп, в два раза большем числа катушек катушечной концентрической обмотки. Например, при числе пазов на полюс и фазу q = 4 все катушки–секции можно мотать двойными. На рис. 41 приведена схема однослойной секционной обмотки с чередующимися шагами при q = 3.

33. Укорочение шага обмотки по пазам в однослойной секционной обмотке и обмоточный коэффициент.

Как известно, в цепных обмотках шаг по пазам является нечетным числом и, следовательно, вторая сторона секции должна попасть в четный паз. Если по расчету получается четный шаг, тогда для выполнимости обмотки его делают нечетным, на единицу меньшим расчетного, например, при yп = 6 следует брать шаг y'п = 5, что дает укорочение шага на один паз. Укорочение шага влияет на величину индуктированной э. д. с. в обмотке, так как обмоточный коэффициент уменьшается.

Укорочение шага обмотки в долях от полюсного деления:

$$\beta = \frac{y\text{п} - ny}{y\text{п}}$$

где: ny – число пазов укорочения.
Коэффициент укорочения:

$$f\text{к} = sin \times \left(\beta \times \frac{\pi}{2}\right)$$

(для простой катушечной обмотки β = 1 и fк = 1).
Коэффициент распределения обмотки:

$$fa = \frac{sin \times \frac{\pi}{2m}}{q \times sin \times \frac{\pi}{2mq}}$$

Общий обмоточный коэффициент:

$$fw = fa \times f\text{к}$$

Значения обмоточных коэффициентов даны в табл. 12а.

Таблица 12а. Значения обмоточных коэффициентов трехфазной обмотки.

q	β	fw однослойной обмотки	fк	fw двухслойной обмотка
2	$\frac{5}{6}$	0,966	0,966	0,933
3	$\frac{8}{9}$	0,96	0,985	0,945
3	$\frac{7}{9}$	0,96	0,94	0,902
4	$\frac{10}{12}$	0,958	0,986	0,925
4	$\frac{9}{12}$	0,958	0,924	0,884
5	$\frac{13}{15}$	0,957	0,978	0,937
5	$\frac{12}{15}$	0,957	0,951	0,91

34. Двухслойные секционные трехфазные обмотки.

Двухслойные секционные обмотки имеют в пазах два слоя секций, подобно якорным обмоткам машин постоянного тока (рис. 42). Каждая секция одной стороной вкладывается в верхний слой паза, а другой стороной – в нижний слой.

Число секций всегда равно числу пазов. По схеме намотки двухслойные обмотки могут быть петлевыми и волновыми. Петлевые обмотки, главным образом, применяются для статоров, а волновые для роторов. В зависимости от формы и размеров сечения проводника секции обмоток бывают мягкими и жесткими.

Мягкие секции наматываются из круглого провода и вкладываются в пазы через прорези (всыпная обмотка), а жесткие секции вставляются в открытые пазы (стержневая обмотка). Для роторов стержневая обмотка выполняется разрезной из полустержней, которые вставляются в закрытые пазы с торца ротора. Двухслойные обмотки имеют очень широкое распространение. Статоры и роторы машин средней и большой мощности выполняются исключительно с двухслойными обмотками. Процесс изготовления и укладки секций в пазы прост и дешев, что особенно важно при серийном производстве. Двухслойные обмотки допускают применение дробного числа пазов на полюс и фазу, а это позволяет один и тот же штамп статора использовать для машин с разными числами полюсов. Двухслойные обмотки допускают любое укорочение шага.

Укорочение шага рекомендуется выбирать примерно 0,8 × *у*п, т. е. 0,8 от полного шага, тогда влияние высших гармоник поля будет наименьшее. Двухслойные обмотки с укорочением шага по пазам имеют следующие преимущества:

1) экономия меди за счет уменьшения длины лобовых частей;
2) кривая поля становится близкой к синусоиде:
3) уменьшение индуктивного и активного сопротивлений;
4) повышенный к. п. д. и cos φ.

Эти преимущества привели к массовому применению двухслойных обмоток с укорочением шага, которые вытеснили однослойные секционные и простые катушечные обмотки в крупных машинах.

В двухслойных секционных обмотках важную роль играет число пазов на полюс и фазу (q), которое характеризуется числом последовательно соединенных элементарных секций в катушечной группе данной фазы. На рис. 43 показаны катушечные группы двухслойной обмотки. В двухслойной обмотке число катушек вдвое больше, чем в однослойной катушечной обмотке.

Катушечные группы можно соединять между собой в фазе либо последовательно, либо параллельно, либо последовательно–параллельно. Максимальное число параллельных ветвей всегда равно $2p$ и поэтому вдвое больше числа параллельных ветвей простой катушечной обмотки.

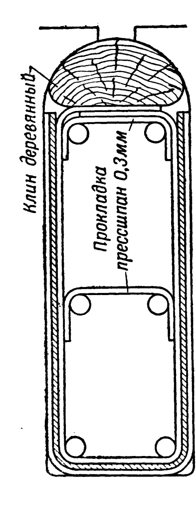


Рис. 42. Укладка в паз двухслойной обмотки.

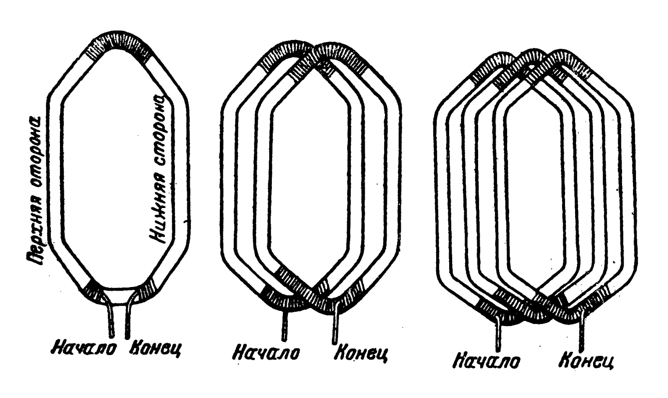


Рис. 43. Катушечные группы двухслойной обмотки.

35. Двухслойные обмотки с дробным числом пазов на полюс–фазу.

Двухслойные обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу часто встречаются в практике. Схемы обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу имеют некоторые особенности. Для выполнения симметричной обмотки необходимо получить во всех трех фазах равные э. д. с. и одинаковый электрический угловой сдвиг между началами и концами фаз. Кроме того, число катушек в каждой параллельной ветви фазы должно быть обязательно числом целым, $z/m{\times}a$ т. е. целому числу. Дробное число пазов на полюс и фазу можно представить в виде следующего выражения:

$$q = b + \frac{c}{d} = \frac{b \times d + c}{d} \neq \text{целому числу}$$

где: d– знаменатель дроби; c – числитель дроби; b – целое число смешанной дроби.
Например, если:

$$q = 1 = 1 \times \frac{1}{2} = 1 + \frac{1}{2}, \text{то } b = 1, c = 1, d = 2$$

Знаменатель d по условию симметрии обмотки не должен быть кратным 3. Для условия симметрии также необходимо, чтобы $\frac{2p}{a \times d}$ = целому числу (a – число параллельных ветвей). Но для дробного q такое условие не всегда выполнимо. Например, при $2p = 6$, q= 1 ½ и $a = 2$, $\frac{2p}{a \times d} = \frac{6}{2 \times 2} =$ 1,5 т. е. не равно целому числу.
Число катушек на одну параллельную ветвь фазы:

$$\frac{z}{m \times a} = \frac{2p \times m \times (\frac{b \times d + c}{d})}{m \times a} = \frac{2p}{a \times d} \times (b \times d + c) = \frac{6}{2 \times 2} \times (1 \times 2 + 1) = \frac{6}{4} \times 3 = \frac{18}{4} = 4{,}5$$

т. е. также не равно целому числу. Вследствие этого получается в каждой параллельной ветви не целое число катушек, не равные э. д. с., а, следовательно, появятся уравнительные токи, которые вызовут дополнительные потери и нагрев обмотки. Чтобы избежать этого, необходимо катушечные группы каждой фазы при дробном числе пазов на полюс и фазу располагать в таком порядке, который создавал бы одинаковые э. д. с. в параллельных ветвях. Катушечные группы выполняются из целого числа элементарных катушек, и при дробном q должно быть чередование катушек то с большим числом элементарных катушек, то с меньшим. Таким образом, дробное число пазов на полюс и фазу понятие относительное и получается как среднее арифметическое число между числами элементарных катушек соседних катушечных групп. Например, при q = 1 ½ получается из чередования одной элементарной катушки и двух элементарных катушек обмотки (1, 2) (1, 2) (1, 2) и т. д. Группу цифр 1, 2 будем называть рядом обмотки. Дробное число q, выражаемое как:

$$q = b + \frac{c}{d}$$

всегда находится в пределах $(b + 1) > q > b$.

При q = 2 ½ обмотка состоит из катушечных групп, содержащих по 2 и 3 элементарные катушки. Пусть A – число катушечных групп фазы, состоящих из b катушек, B – число катушечных групп фазы, состоящих из $(b + 1)$ катушек. Тогда общее число катушечных групп фазы будет:

$$A + B = \frac{n\text{к}}{m} = \frac{2m}{m} = 2p$$

Сумма чисел элементарных катушек фазы выразится:

$$A \times b + B \times (b + 1) = b \times (A + B) + B = 2p + B$$

но,

$$2pb + B = 2p \times q = 2p \times \left(\frac{b \times d + c}{d}\right) = 2p \times b + 2p \times \frac{c}{d}$$

откуда:

$$B = 2p \times \frac{c}{d} \quad \text{и} \quad A = 2p - B = 2p - 2p \times \frac{c}{d} = 2p \times \left(1 - \frac{c}{d}\right)$$

Следовательно,

$$A = 2p \times \left(1 - \frac{c}{d}\right)$$

В обмотке, имеющей a параллельных ветвей, уравнения примут следующий вид:

$$\frac{A}{a} = \frac{2p}{a} \times \left(1 - \frac{c}{d}\right) \quad \text{и} \quad \frac{B}{a} = \frac{2p}{a} \times \frac{c}{d}$$

т. е. число элементарных катушек в a раз меньше, чем при последовательном соединении.

Пример 1. Дана десятиполюсная обмотка, имеющая число пазов на полюс и фазу

$$q = 4½ \quad \text{и} \quad a = 5$$

тогда:

$$\frac{A}{a} = \frac{2p}{a} \times \left(1 - \frac{c}{d}\right) = \frac{10}{5} \times \left(1 - \frac{1}{2}\right) = \frac{10}{5} \times \frac{1}{2} = 1 \qquad \frac{B}{a} = \frac{2p}{a} \times \frac{c}{d} = \frac{10}{5} \times \frac{1}{2} = 1$$

В данной обмотке каждая параллельная ветвь состоит из одной катушечной группы, имеющей четыре элементарных катушки (четыре последовательно соединенные секции), и одной катушечной группы, имеющей пять элементарных катушек. Таким образом:

$$q = \frac{4 + 5}{2} = 4½$$

и является средним арифметическим числом чисел 4 и 5.
Число пазов $z = 2p \times m \times q = 10 \times 3 \times 4{,}5 = 135$. Для создания симметрии поля катушечные группы обмотки должны чередоваться по закономерному ряду цифр, состоящих из (b + 1) и b элементарных катушек. Число рядов обмотки:

$$n\text{р} = \frac{2pm}{d}$$

где: d – знаменатель дроби. Число цифр в каждом ряду равно общему знаменателю дроби d, не кратному трем, а сумма цифр в ряду равна числителю неправильной дроби, т. е.

$$N\text{р} = b \times d + c$$

Пример 2. Дано дробное число пазов на полюс и фазу $q = 1\,½$, число полюсов $2p = 4$, число фаз $m = 3$. Необходимо определить число рядов обмотки и составить ряд, а также чередование катушечных групп обмотки. Так как:

$$q = b + \frac{c}{d} = 1 + \frac{1}{2}$$

где:

$$b < q < (b+1), \text{ то } b = 1, b+1 = 2, c = 1 \text{ и } d = 2$$

Число пазов $z = 2p \times m \times q = 4 \times 3 \times 1{,}5 = 18$.
Число цифр в каждом ряду $d = 2$.
Сумма цифр в ряду $N\text{р} = b \times d + c = 1 \times 2 + 1 = 3$
Число рядов:

$$n\text{р} = \frac{2p \times m}{d} = \frac{4 \times 3}{2} = 6$$

Ряд цифр (1, 2).
Чередование катушечных групп в обмотке или суммарное количество рядов:

(1, 2) (1, 2) (1, 2) (1, 2) (1, 2) (1, 2)

При дробных пазах на полюс и фазу для наглядности можно катушечные группы размещать в таблице (табл. 13), где строго соблюдать:

1) $zm_1 = zm_2 = zm_3 = \frac{z}{m}$ = целому числу, иначе будет неравномерная нагрузка фаз.

2) $z_{2p1} - z_{2p2} = \pm 1$ и $z_{2p2} - z_{2p3} = \pm 1$

или, что лучше $z_{2p1} - z_{2p2} = 0$

Таблица 13.

Полюсы	Фазы		
	I	III	II
I полюс	–	–	–
II полюс	–	–	–
III полюс	–	–	–
IV полюс	–	–	–
z/m	zm_1	zm_3	zm_2

Пример 3. Дано $z = 27$, $2p = 4$, $m = 3$. Составить чередование катушечных групп обмотки и разместить их в таблице. Число пазов на полюс–фазу:

$$q = \frac{z}{2p \times m} = \frac{27}{4 \times 3} = 2¼$$

$$q = b + \frac{c}{d} = 2 + \frac{1}{4}$$

откуда:

$$b = 2, c = 1, d = 4 \text{ и } b + 1 = 3$$

Число цифр в ряде: $d = 4$.
Сумма цифр в ряде: $N\text{р} = b \times d + c = 2 \times 4 + 1 = 9$. Ряд цифр: (2223). Число рядов обмотки:

$$n\text{р} = \frac{2p \times m}{d} = \frac{4 \times 3}{4} = 3$$

Чередование катушечных групп обмотки:

(2223) (2223) (2223)

Из табл. 14 видно, что:

$$\frac{z}{m} = \frac{27}{3} = 9 \qquad \frac{z}{2p} = \frac{27}{4} = 6{,}75, \quad z_{2p1} = 6, \quad z_{2p2} = 7, \quad z_{2p3} = 7, \quad z_{2p4} = 7$$

что вполне удовлетворительно.
Хотя при знаменателе дроби, равном 3, обмотка получается несимметричной, но в практике, особенно при перемотке, такие обмотки все же применяются в случае необходимости использовать готовый статор для перемотки на другое число полюсов.

Построение схем обмотки с знаменателем дроби, равным 3, основано на специальных приемах подбора катушечных групп. Для этого в каждом ряду увеличиваем на единицу число катушечных групп, состоящих из b или $(b + 1)$ элементарных катушек, а последний ряд будет являться прибавком до числа пазов z и поэтому состоять из какого–либо числа $(b + 1)$ и b элементарных катушек (или только лишь из $(b + 1)$ или из b).

Таблица 14.

Полюсы	Фазы		
	I	III	II
I полюс	2	2	2
II полюс	3	2	2
III полюс	2	3	2
IV полюс	2	2	3
z/m	9	9	9

Исходя из этого, каждый ряд обмотки будет состоять из числа цифр, на единицу больше общего знаменателя, кратного трем $(d + 1)$, а сумма цифр увеличивается на $(b + 1)$ или на b элементарных катушек. Если в смешанной дроби при дробном числе пазов на полюс и фазу дробь меньше ½ (например ⅓), то необходимо прибавить к каждому ряду по b элементарных катушек, а при дроби, большей ½ (например ⅔), прибавить по $(b + 1)$ элементарных катушек.

Сумма цифр в ряду при: $\frac{c}{d} > ½$

$$N\text{р} = b \times d + c + b = b \times (d + 1) + c$$

или окончательно:

$$N\text{р} = b \times (d + 1) + c$$

Сумма цифр в ряду при: $\frac{c}{d} > \frac{1}{2}$

$$N\text{р} = b \times d + c + b + 1 = b \times (d + 1) + (c + 1)$$

или окончательно:

$$N = b \times (d + 1) + (c + 1)$$

Тогда для первого и второго случая дробного числа пазов на полюс и фазу числа одинаковых рядов:

$$n\text{р} = \frac{z}{N\text{р}} - D$$

где: z – число пазов; D – остаток, а сумма цифр в добавочном ряду определится:

$$N\text{д} = z - n\text{р} \times N\text{р}$$

Пример 1. Дано: $q = 2⅓$, $2p = 6$, $m = 3$. Определить чередование катушечных групп обмотки. При:

$$q = b + \frac{c}{d} = 2 + ⅓, b = 2, c = 1, b + 1 = 3, d = 3$$

Число цифр в ряду $d + 1 = 3 + 1 = 4$.
Сумма цифр в ряду при: $\frac{c}{d} = ⅓ < ½$:

$$Np = b \times (d + 1) + c = 2 \times (3 + 1) + 1 = 9$$

Ряд цифр: (2223)
Число пазов: $z = 2p \times m \times q = 6 \times 3 \times 2⅓ = 42$
Число одинаковых рядов:

$$n\text{р} = \frac{z}{N\text{р}} - D = \frac{42}{9} - D = 4{,}66 - D$$

где: $n\text{р} = 4$, $D = 0{,}66$, т. е. неполный пятый ряд.

Сумма цифр добавочного ряда:

$$N\text{д} = z - n\text{р} \times N\text{р} = 42 - 4 \times 9 = 6$$

Добавочный пятый ряд: (33). Чередование катушечных групп обмотки:
(2223) (2223) (2223) (2223) (33)

Пример 2. Дано: q = 2 ⅔, $2p$ = 6, m = 3. Определить чередование катушечных групп обмотки. При:

$$q = b + \frac{c}{d} = 2 + ⅔, b = 2, b + 1 = 3, c = 2, d = 3$$

Число цифр в ряду: d + 1 = 3 + 1 = 4.
Сумма цифр в ряду при: $\frac{c}{d} = ⅔ > ½$

$$N\text{р} = b \times (d + 1) + (c + 1) = 2 \times (3 + 1) + (2 + 1) = 11$$

Ряд цифр: (2333).
Число пазов z = $2p$ × m × q = 6 × 3 × 2⅔ = 48.
Число одинаковых рядов:

$$n\text{р} = \frac{z}{N\text{р}} - D = \frac{48}{11} - D = 4{,}36 - D$$

откуда:

$$n\text{р} = 4 \quad \text{и} \quad D = 0{,}36 \text{ (неполный пятый ряд)}$$

Сумма цифр добавочного ряда:

$$N\text{д} = z - n\text{р} \times N\text{р} = 48 - 4 \times 11 = 4$$

Добавочный пятый ряд: (22). Чередование катушечных групп обмотки:
(2333) (2333) (2333) (2333) (22).

36. Выбор начал фаз в обмотке с дробным числом пазов на полюс и фазу.

Как известно, геометрическая окружность разделяется на 360°. У двухполюсной машины по окружности расположено 2 полюса. При увеличении числа полюсов в два раза по окружности будет расположено 4 полюса и пара полюсов будет занимать только половину окружности, т. е. 180°. Поэтому в электрических системах различают геометрические и электрические градусы, считая два полюса за полную окружность, т. е. 360 электрических градусов.
Таким образом можно установить соотношение между геометрическими градусами. Так, например, в восьмиполюсной машине каждая пара полюсов будет занимать 90 геометрических градусов и 360 электрических градусов. Каждый геометрический градус будет соответствовать четырем электрическим, а вся окружность статора будет составлять – 360 × 4 = 1440 электрических градусов. Обозначим $\gamma°_{геом}$ – геометрический угол между двумя соседними пазами; $\gamma°_{эл}$ – электрический угол между двумя соседними пазами, тогда:

$$\gamma°\text{геом} = \frac{2\pi}{z} = \frac{360°}{z} \qquad \text{где } z \text{ число пазов, откуда:} \qquad \gamma°\text{эл} = \frac{360° \times p}{z}$$

Так как начала соседних фаз отстоят друг от друга на некоторое число пазов то электрический сдвиг между началами фаз определится:

$$a°\text{эл} = nz \times \gamma°\text{эл}$$

откуда найдем число пазов между началами соседних фаз (между первой и второй фазами и между второй и третьей фазами)

$$nz = \frac{a°эл}{\gamma°эл} = \text{целому числу}$$

В трехфазной обмотке начала фаз должны быть симметрично распределены на двойном полюсном делении. Поэтому для m = 3, a°*эл* = 120° – 240° – 480° и т. д.
Всегда следует выбирать для простоты составления схемы обмотки начало первой фазы в первом пазу и исходить отсюда для остальных фаз, т. е. начало первой фазы H_{I} = 1 пазу, тогда начало второй фазы H_{II} = 1 + nz, начало третьей фазы H_{III} = 1 + 2nz. Также необходимо проверить концы фаз, и если электрический угол сдвига соответствует данному числу фаз, то обмотку можно считать симметричной.
Если при испытании машины появляется ненормальный шум, двигатель имеет малый пусковой момент, а у генератора получается неравенство напряжений в фазах, то следует начала и концы фаз проверить на симметричность по электрическому угловому сдвигу между началами или концами соседних фаз.

Пример 1. Дано: z = 27, 2p = 4, m = 3. Определить электрический угол сдвига между соседними пазами и число пазов между началами фаз.
Число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{z}{2p \times m} = \frac{27}{4 \times 3} = 2½$$

Электрический угол сдвига между соседними пазами:

$$\gamma°эл = \frac{360° \times p}{z} = \frac{360° \times 2}{27} = 26{,}7°$$

Число пазов между началами соседних фаз:

$$nz = \frac{a°эл}{\gamma°эл} = \frac{120}{26{,}7} = 4{,}5$$

является дробным, поэтому этот выбор начала фаз не подходит: Выбираем 120° – ную зону, т. е a°эл = 240°. Тогда:

$$nz = \frac{240}{26{,}7} = 9$$

отсюда:

$$H_I = 1 \quad H_{II} = 1 + 9 = 10 \quad H_{III} = 1 + 2 \times 9 = 19$$

Но начало второй фазы совпало с началом третьей фазы, т. е. с "чужой" фазой, поэтому и этот вариант не подходит. Тогда берем 480°, что одно и то же, так как *sin* 120° = *sin* 480°. Итак,

$$nz = \frac{480°}{26{,}7°} = 18$$

отсюда:

$$H_I = 1 \quad H_{II} = 1 + 18 = 19 \quad H_{III} = 1 + 2 \times 18 = 37$$

но так как пазов только 27, то 37 – 27 = 10, что совпадает по фазам, если проследить по чередованию катушечных групп обмотки (табл. 15). Итак, третий вариант подходит.

Таблица 15.

Фазы	I	III	II	I	III	II	I	III	II	I	III	II
Число катушек в группе	2	2	2	3	2	2	2	3	2	2	2	3

Пример 2. Дано: z = 48, 2p = 6, m = 2. Найти электрический угол сдвига между соседними пазами и число пазов между началами фаз простой катушечной обмотки.
1. Число катушек nк = m × p = 2 × 3 = 6, так как при этих катушках не получим необходимый электрический сдвиг, то мотаем "полукатушками", т. е. 12 "полукатушек".

2. Число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{z}{2p \times m} = \frac{48}{6 \times 2} = 4$$

т. е. при намотке берем q = 2 ввиду удвоения числа катушек.
3. Электрический сдвиг между соседними пазами:

$$\gamma°\text{эл} = \frac{360° \times p}{z} = \frac{360° \times 3}{48} = 22{,}5°$$

4. Число пазов между началами соседних фаз:

$$z = \frac{a°\text{эл}}{\gamma°\text{эл}} = \frac{90°}{25{,}5°} = 4 \text{ откуда } H_I = 1 \quad H_{II} = 1 + 4 = 5$$

что нормально, так как дает совпадение начал по фазам (табл. 16.).

Таблица 16.

Фазы	I	II	II	I	I	II	II	I	I	II	II	I	I	И	II	I	I	II	II	I	I	II	II	I
Число катушек в группе	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

37. Соединение катушечных групп в фазе двухслойной секционной обмотки.

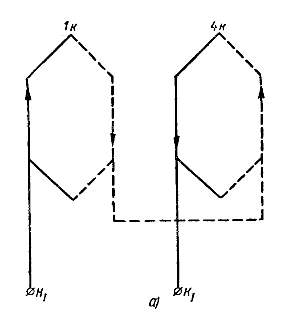
Как известно, двухслойные секционные обмотки в отношении соединения катушечных групп в фазе сложнее однослойных катушечных, поэтому требуется некоторый навык для соединения между собой катушек. Катушечные группы в фазе могут быть соединены последовательно, параллельно или параллельно–последовательно.

Пример 1. Дана двухслойная двухполюсная обмотка. Требуется соединить катушечные группы между собой в фазе:
а) последовательно.
б) параллельно.

а) Соединение последовательное, т. е. в одну параллельную ветвь (a = 1) (рис. 44, а).
б) Соединение параллельное (рис. 44, б).

Пример 2. Дана двухслойная четырехполюсная обмотка. Соединить катушечные группы фазы между собой:
а) последовательно.
б) параллельно–последовательно.
в) параллельно (на aмакс).

а) Соединение катушек между собой последовательно (рис. 45).
б) Соединение катушек между собой параллельно-последовательно a = p = 2 (рис. 46).
в) Соединение катушек между собой параллельно aмакс = 2p = 4 (рис. 47).



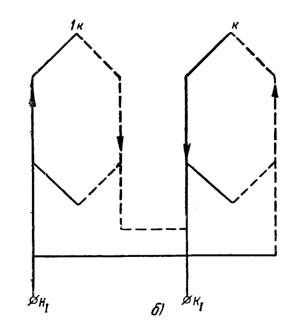


Рис. 44. Соединение катушечных групп в фазе двухполюсной двухслойной обмотки.
а – последовательное; б – параллельное.

Рис. 45. Последовательное соединение катушечных групп в фазе четырехполюсной двухслойной обмотки.

Так как фазовое чередование катушечных групп двухслойной трехфазной обмотки для получения необходимого сдвига всегда Iф. – IIIф. – IIф. и т. д., то схему такой обмотки можно разбить на фазные катушечные группы, приняв первую группу за начало первой фазы. Распределение катушек в фазах для любого числа полюсов дано в табл. 17.

Таблица 17.

Чередование фаз	I ф.	III ф.	II ф.
Чередование катушечных групп	1к + 3 = 4к	5к + 3 = 8к	3к + 3 = 6к
	4к + 3 = 7к	8к + 3 = 11к	6к + 3 = 9к
	7к + 3 = 10к	11к + 3 = 14к	9к + 3 = 12к
	10к + 3 = 13к	1к + 3 = 17к	12к + 3 = 15к
	13к + 3 = 16к		. . . .
	16к + 3 = 19к		. . . .

Итак, исходя из вышеуказанных цифровых рядов, можно составить цепи фаз.
Цепь I ф: 1к – 4к – 7к – 10к – 13к – 16к – 19к...
Цепь II ф: 3к – 6к – 9к – 12к – 15к...
Цепь III ф: 5к – 8к – 11к – 14к – 17к .., где 1к, 3к и 5к – катушечные группы начал фаз, так как:

Iф. – IIIф. – IIф. – Iф. – IIIф. – IIф… 1к – 2к – 3к – 4к – 5к – 6к.., откуда:
от $Н_{\text{I}}$ до $Н_{\text{II}}$ 120° эл. и от $Н_{\text{II}}$ до $Н_{\text{III}}$ 120° эл.

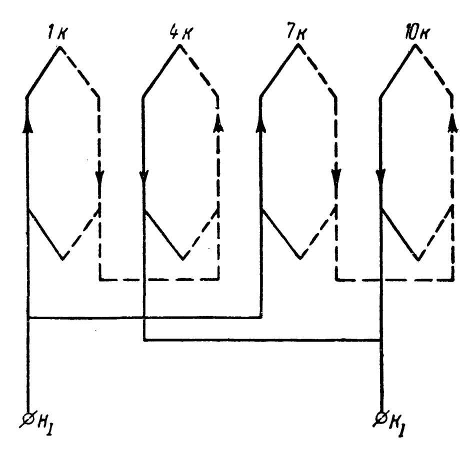


Рис. 46. Соединение катушечных групп в фазе четырехполюсной двухслойной обмотки в две параллельные цепи.

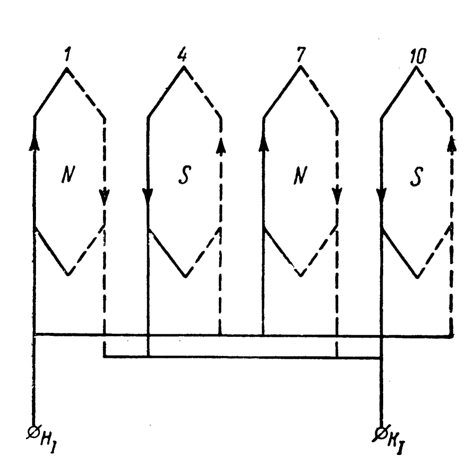


Рис. 47. Соединение катушечных групп в фазе четырехполюсной двухслойной обмотки в четыре параллельные цепи.

Принцип соединения катушечных групп между собой в фазе как при целом q, так и при дробном q ничем не отличается друг от друга, только при выборе параллельных цепей фазы число катушек в каждой параллельной цепи фаз должно быть одинаковое, иначе получится не симметрия.

Если соединить катушечные группы между собой в $a = 2p$ параллельных цепей, то для симметрии обмотки необходимо, чтобы $2p/a \times d = M$, где d – знаменатель дроби, выражающей число пазов на полюс и фазу, а M – целое число.

Подставив вместо a $2p$, получим $2p/2p \times d = M$ или окончательно $d = 1/M$. Но так как d всегда больше единицы, то при дробном числе q нельзя осуществить соединение в $a = 2p$ параллельных цепей, так как они будут иметь катушечные группы с разными элементарными катушками. Для целого числа пазов на полюс и фазу всегда $d = 1$.

Пример 1. Дано: число полюсов $2p = 4$. Требуется осуществить соединение катушек при дробном q в 2 и в 4 параллельные ветви.

Проверяем условия симметрии:

при $a = 2$:

$$\frac{2p}{a \times d} = \frac{4}{2 \times d} = \frac{2}{d} = \text{целому числу}$$

при $a = 4$:

$$\frac{2p}{a \times d} = \frac{4}{4 \times d} = \frac{1}{d} = \text{целому числу}$$

В первом случае целому числу при $2p/a \times d$ = целому числу при $d = 2$ следовательно, обмотка выполнима при пазах на полюс и фазу $q = 1½, 2½, 3½$ и т. д.

Во втором случае обмотка при дробном числе пазов на полюс и фазу невыполнима.

Пример 2. Дано: число полюсов $2p = 6$. Требуется осуществить соединения катушек при дробном q в 2, 3 и 6 параллельных цепей.

Проверяем условия симметрии:

при $a = 2$

$$\frac{2p}{(a \times d)} = \frac{6}{2 \times d} = \frac{3}{d} = \text{целому числу}$$

при $a = 3$

$$\frac{2p}{(a \times d)} = \frac{6}{3 \times d} = \frac{2}{d} = \text{целому числу}$$

при $a = 6$

$$\frac{2p}{(a \times d)} = \frac{6}{6 \times d} = \frac{1}{d} = \text{целому числу}$$

В первом случае для получения целого числа необходимо $d = 3$, во втором $d = 2$, в третьем нельзя подобрать, так как всегда $d > 1$.

Но в первом случае обмотка все же несимметричная, потому что на фазу приходятся неравные числа катушек A, состоящих из b элементарных катушек и В, состоящих из $(b + 1)$ элементарных катушек, т. е. А ≠ В. При:

$$q = 1⅓, b = 1, c = 1 \text{ и } d = 3$$

будет:

$$\frac{A}{a} = \frac{2p}{a} \times \left(1 - \frac{c}{d}\right) \quad \frac{A}{2} = \frac{6}{2} \times (1 - ⅓) = \frac{6}{2} \times \frac{2}{3} = 2$$

и

$$\frac{B}{a} = \frac{2p}{a} \times \frac{c}{d} \quad \frac{B}{2} = \frac{6}{2} \times \frac{1}{3} = 1$$

Пример 3. Дано: число полюсов 2*p* = 8. Требуется осуществить соединения катушек при дробном *q* в 2, 4 и 8 параллельных цепей.
Проверяем условия симметрии:
при *a* = 2:

$$\frac{2p}{(a \times d)} = \frac{8}{2 \times d} = \frac{4}{d} = \text{целому числу}$$

при *a* = 4:

$$\frac{2p}{(a \times d)} = \frac{8}{4 \times d} = \frac{2}{d} = \text{целому числу}$$

при *a* = 8:

$$\frac{2p}{(a \times d)} = \frac{8}{8 \times d} = \frac{1}{d} = \text{целому числу}$$

В первом случае выполнима обмотка при знаменателе дроби *d* = 2 и *d* = 4, т. е. при *q* = 1½, 2½, 1¼, 1¾, 2¼ и т. д. Во втором случае выполнима обмотка при знаменателе дроби только лишь *d* = 2, т. е. *q* = 1½, 2½, 3½ и т. д. В третьем случае нельзя соединять катушки в параллельные цепи.

38. Однофазные двухслойные секционные обмотки.

Обычно в трехфазных обмотках ширина фазной зоны выбирается 60 электрических градусов, так как на каждые два полюсных шага (*a*°эл = 360°) приходится шесть фазных зон (I ф. – III ф. – II ф. – I ф. – III ф. – II ф. и т. д.). Однофазные двухслойные обмотки точно так же, как и однослойные катушечные, отличаются от трехфазных тем, что выполняются с фазной зоной вдвое большей, т. е. стодвадцатиградусной. Метод составления схемы однофазной обмотки такой же, как и для трехфазной, но только заполняют ⅔ пазов рабочей обмоткой, а ⅓ пазов – пусковой. Шаги обмоток по пазам надо брать как для рабочей, так и для пусковой обмоток одинаковыми и исходить при определении шага из полного числа пазов (рис. 48).

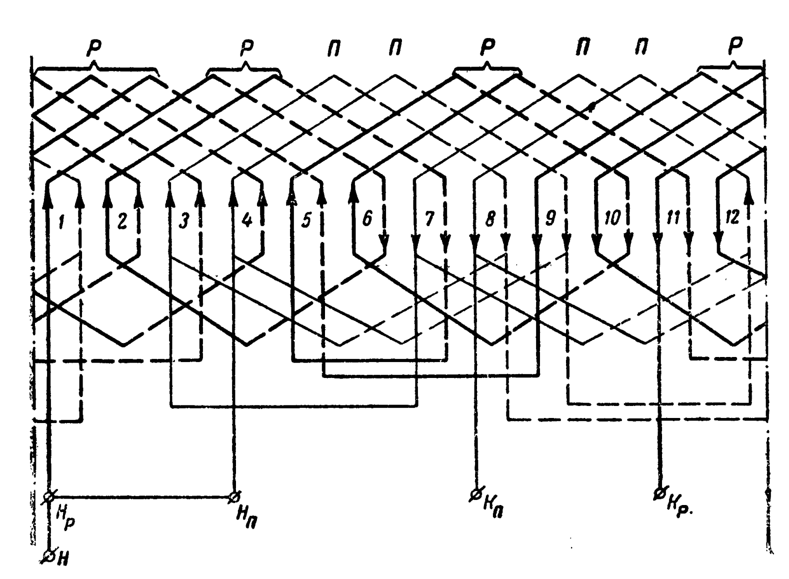


Рис. 48. Схема двухслойной однофазной обмотки.
z = 12, 2p = 2, m = 1, qр = 4, qп = 2, a = 1.

39. Волновые двухслойные обмотки ротора асинхронных двигателей.

Волновые роторные обмотки осуществляются иначе, чем петлевые, как по схеме, так и по принципу закладки в пазы. Роторные волновые обмотки состоят из полустержней, которые вставляются в закрытые пазы с торца ротора.

В каждом слое паза располагается по одному стержню (реже по 2 стержня). Небольшое количество стержней в пазу объясняется требованием иметь низкое напряжение при разомкнутых кольцах ротора для безопасности обслуживания в эксплуатации и удешевления обмотки ротора. Напряжение свыше 500 *в* выбирать не рекомендуется, лучше до 300 *в*.

Число стержней ротора *N*ст. = 2*z* при числе стержней в пазу равном 2. Рекомендуется волновую обмотку выполнять с нормальным шагом, равным полюсному делению или отличными друг от друга передним и задним шагами.

Если передние и задние шаги брать различными, то сумма двух шагов должна равняться двойному полюсному делению. Число пазов на полюс и фазу характеризует число повторений поступательных движений волны, и когда данная волна сделает *q* обходов, то начнется движение волны в обратную сторону, т. е. против часовой стрелки (рис. 49).

Соединение прямо–поступательных и обратно – поступательных волн происходит при помощи провода, называемого перемычкой. Число таких перемычек равно трем по числу фаз (рис. 50).

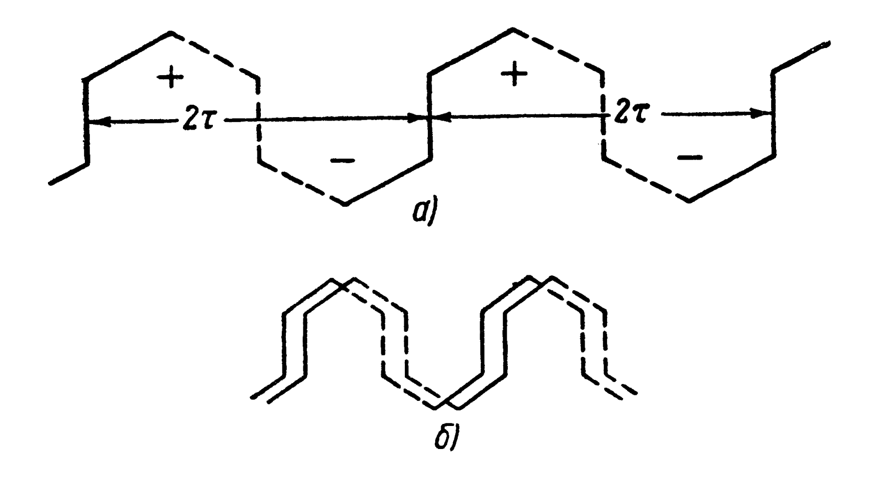


Рис. 49. Волновая обмотка ротора.
а – при q = 1; б – при q = 2.

При выборе начал и концов фаз следует учесть, чтобы перемычки при четном числе пар полюсов друг с другом не перекрещивались, иначе трудно сбалансировать ротор. Перемычки при нечетном числе пар полюсов всегда перекрещиваются.

Кроме графического изображения волновой обмотки в развернутом виде удобно, особенно для большого числа пазов, составлять цифровую схему, которая дает быстрое нахождение начал и концов фаз, а также размещение их перемычек по окружности ротора, что является очень ценным в производстве (табл. 18).

Нижний слой стержней *q* и *z*п соединяются перемычкой, где *z*п–*n*–й паз или *n*–й стержень нижнего слоя, Н. С. и В. С. – нижний и верхний слои.

Данная схема составлена для первой фазы и аналогично можно составить для остальных двух фаз, предварительно выбрав электрический сдвиг "между началами фаз, т. е. H_{I} = 1 паз, $H_{II} = 1 + nz$ паз и $H_{III} = 1 + 2nz$ паз.

Однако, для второй и третьей фаз можно не составлять цифровые схемы, а просто воспользоваться числом пазов от первой фазы до второй *n*z и из цифровой схемы первой фазы концом фазы и перемычкой, а затем произвести следующие элементарные подсчеты:

начало Iф ... $H_{I} = 1$;   начало IIф ... $H_{II} = nz + 1$ начало IIIф … $H_{III} = 1 + 2nz$

Аналогично найдем концы – фаз:

$$\text{конец Iф} \dots \text{к}_I = \frac{z}{2p} + 1 \quad \text{конец IIф} \dots \text{к}_{II} = nz + \left(\frac{z}{2p} + 1\right) \quad \text{конец IIIф} \dots \text{к}_{III} = 2nz + \left(\frac{z}{2p} + 1\right)$$

Перемычки фаз определяются: перемычка Iф ... q __________ zп,

где: q – число пазов на полюс и фазу; zп – n–й нижний стержень, соответствующий q и последнему полюсу $2p$;
перемычка IIф ... (q + nz) ________ (zп + nz)
перемычка IIIф ... (q + 2nz) ________ (zп + 2nz)

Таблица 18.

Прямой обход						
№ полюсов	1	2	3	4		$2p$
Число пазов на полюс и фазу q	В. С.	Н. С.	В. С.	Н. С.		Н. С.
	1 Начало фазы	$\frac{z}{2p} + 1$ конец фазы (В. С.)	$2 \times \frac{z}{2p} + 1$	$3 \times \frac{z}{2p} + 1$	...	$(2p-1) \times \frac{z}{2p} + 1$
	2	$\frac{z}{2p} + 2$	$\frac{z}{p} + 2$	$1{,}5 \times \frac{z}{2p} + 2$	...	$(2p-1) \times \frac{z}{2p} + 2$
	3	$\frac{z}{2p} + 3$	$\frac{z}{p} + 3$	$1{,}5 \times \frac{z}{2p} + 3$	...	$(2p-1) \times \frac{z}{2p} + 3$
	...	...	...	...	...	...
	q Н. С.	$\frac{z}{2p} + q$	$\frac{z}{p} + q$	$1{,}5 \times \frac{z}{2p} + q$	...	$z\text{п} = (2p-1) \times \frac{z}{2p} + q$

перемычка

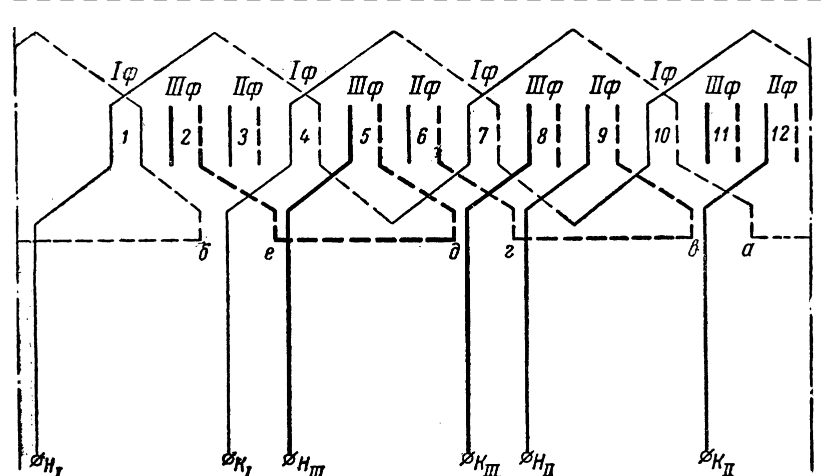


Рис. 50. Схема трехфазной волновой стержневой обмотки. z = 12; $2p$ = 4; m = 3.
б – перемычка первой фазы (Iф.); *вг* – перемычка второй фазы (IIф); *де* – перемычка третьей фазы (IIIф).

Пример 1. Дано: z = 96, $2p$ = 8, m = 3, a= 1. Требуется составить цифровую схему (табл. 19) для Iф. и определить все начала и концы фаз, а также расположение перемычек. Находим:

$$q = \frac{z}{2p \times m} = \frac{96}{3 \times 8} = 4 \quad \text{уп} = \frac{z}{2p} = \frac{96}{8} = 12 \quad (1-13)$$

$$\gamma°эл = \frac{360° \times p}{z} = \frac{360° \times 4}{96} = 15° \quad nz = \frac{a°эл}{\gamma°эл} = \frac{480°}{15°} = 32$$

Таблица 19.

Цифровая схема 1 фазы.

В. С.	Н. С.	В. С.	Н. С.	В. С.	Н. С.	В. С.	Н. С.
1 H_I	13 k_I	25	37	49	61	73	85
2	14	26	38	50	62	74	86
3	15	27	39	51	63	75	87
4	16	28	40	52	64	76	88

Затем определяем: Начала фаз:

H_I = 1 В. С. (верхний слой).
H_{II} = 1 + nz = 1 + 32 = 33 В. С.
H_{III} = 1 + 2nz =1 + 2 × 32 = 65 В. С
Концы фаз:

$$к_I = 1 + \frac{z}{2p} = 1 + \frac{96}{8} = 13 \text{ В.С.}$$

$$к_{II} = nz + \left(1 + \frac{z}{2p}\right) = 32 + 13 = 45 \text{ В.С.}$$

$$к_{III} = 2nz + \left(1 + \frac{z}{2p}\right) = 2 \times 32 + 13 = 77 \text{ В.С.}$$

Перемычки:

Iф (из цифровой схемы) 4 (Н. С.) ________ 88 (Н. С.), где q = 4

и

IIф. ….. (q + nz) _________ (zп + nz) = 4 + 32 = 36 Н. С. __________ 88 + 32 = 120 – 96 = 24

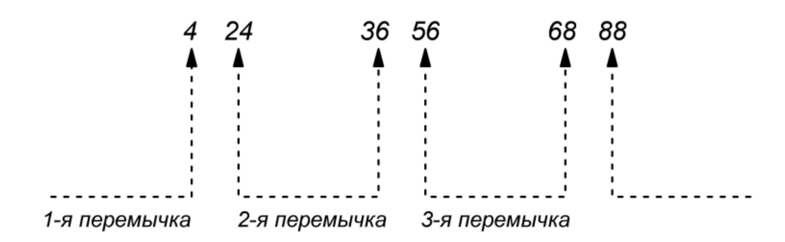
итак, 24 Н. С. ___________ 36 Н. С.

IIIф. ….. (q + 2nz) ______ (zn + 2nz) = 4 + 2 × 32 = 68 Н. С. ______ 88 + 2 × 32 = 152 – 96 = 56 Н. С.

итак, 56 Н. С. ___________ 68 Н. С.

Расположение перемычек нормальное, т. е. они не перекрещиваются друг с другом. Размещение перемычек по окружности ротора дано в табл. 20.

Таблица 20.



Начала и концы фаз волновой обмотки при целом q всегда выходят из верхних стержней, а перемычки – из нижних стержней. Можно намотать волновую обмотку и с дробным числом пазов на полюс и фазу (например, q = 1½; 2½ ; 3½; 4½ = и т. д.), но при этом, как известно, получим число пазов на полюс, неравное целому числу. Отсюда нормальный шаг обмотки не получится равным полюсному делению τ, а либо короче, либо длиннее, а сумма шагов должна быть равна 2τ.

Шаги должны чередоваться: удлиненный шаг y''п с укороченным шагом y'п. Разность между y'п и yп обычно равна единице: y''п – y'п = 1.
Пусть y'п – шаг секции со стороны выводов, а yп – шаг секции со стороны, противоположной выводам, тогда укороченный шаг y''п = y'п – 1.

Рассмотрим два случая:
1–й случай. Шаг со стороны выводов на 1 больше шага с противоположной стороны, тогда:

$$y\text{п} = y'\text{п} - 1., \qquad \text{а} \qquad y''\text{п} = y'\text{п} - 1 = y\text{п} + 1 - 1 = y\text{п}$$

(рис. 51)
2–й случай. Шаг со стороны выводов на 1 меньше шага с противоположной стороны, тогда:

$$y'\text{п} = y\text{п} - 1, \text{а} \qquad y''\text{п} = y'\text{п} - 1 = y\text{п} - 1 - 1 = y\text{п} - 2$$

(рис. 52)

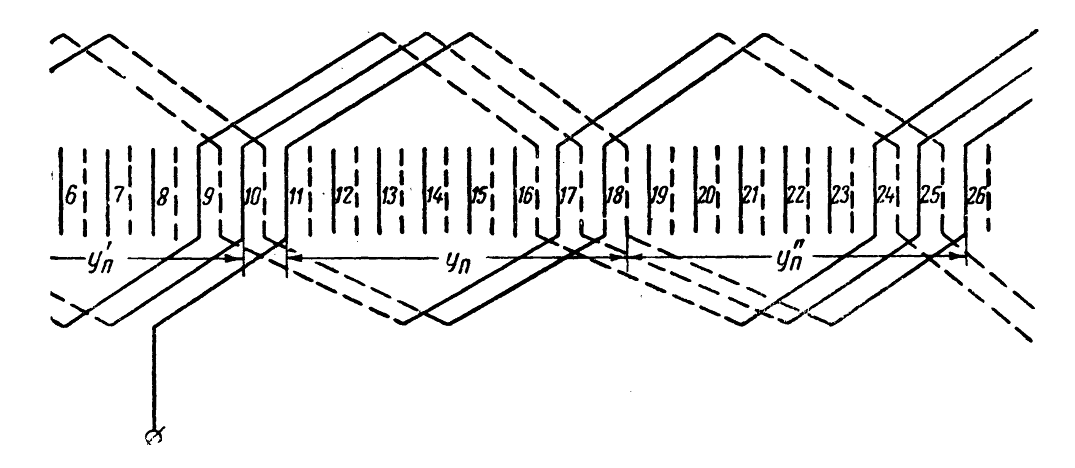


Рис. 51. Схема волновой обмотки ротора с дробным числом пазов на полюс и фазу (q = 2½) при шаге со стороны выводов большем шага с противоположного стороны.

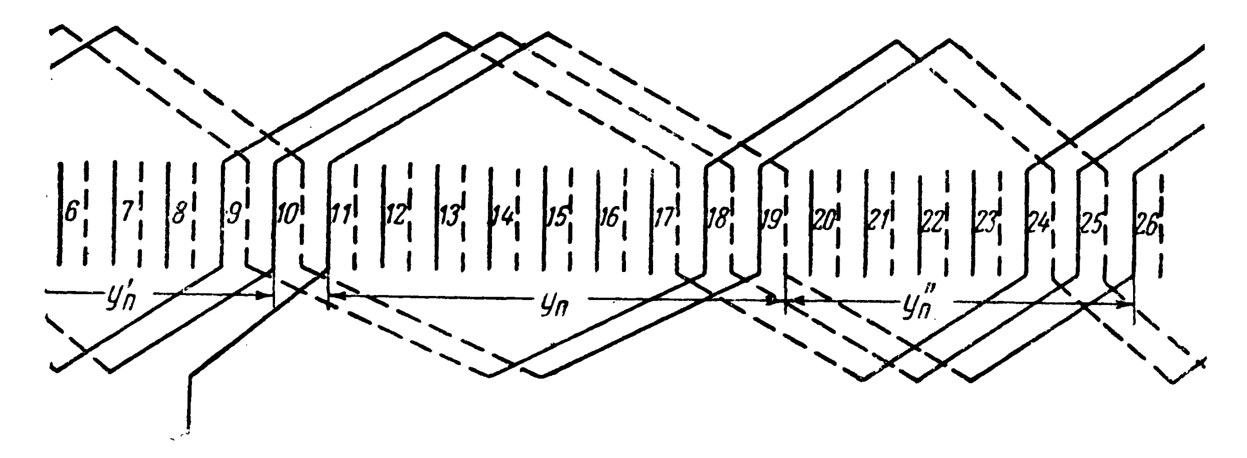


Рис. 52. Схема волновой обмотки ротора с дробным числом пазов на полюс и фазу (q = 2½) при шаге со стороны выводов меньшем шага с противоположного стороны.

Числа пазов фазной зоны одной и той же фазы равны то величине (q_2 + ½), то (q_2 – ½), а каждый стержень верхнего слоя должен быть соединен со стержнем нижнего слоя на расстоянии полюсного деления τ. Таким образом, получаются два соседних фронта волн с числом волн (q_2 – ½) и и (q_2 + ½), имеющие верхний и нижний слои с определенными числами пазов. Ротор будет иметь три ветви обмотки с (q_2 – ½) обходами и три ветви с (q_2 + ½) обходами. Кроме того, на каком–либо участке волн в каждой из фаз в пазу могут оказаться две различные фазы: одна фаза – верхний стержень, другая – нижний, что напоминает статорную обмотку с укорочением шага.

40. Составление схем однослойных простых катушечных обмоток.

Для составления схем однослойных простых катушечных обмоток не требуется большого опыта. Необходимо руководствоваться следующими данными:

1. Число полюсов двигателя $2p$.
2. Число фаз m.
3. Число пазов z (для однофазных m = 1, zр = ⅔ × z и zп = ⅓ × z).
4. Число катушек или катушечных групп nк = m × p, а для m = 1, nк.р = $2p$ × m.
5. Число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{z}{2p \times m} \text{ а для } m = 1, q\text{р} = \frac{z\text{р}}{2p \times m} \text{ и } q\text{п} = \frac{z\text{п}}{2p \times m}$$

6. Число пазов между сторонами катушки:

$$n\text{п} = \frac{z}{n\text{к}} \quad \text{или } n\text{р} = 2q \text{ а для } m = 1, n\text{п(р)} = 2q\text{п и } n\text{п(п)} = 2q\text{р}.$$

Если nп является нечетным числом 3, 5, 7 и т. д., то среднее число элементарных катушек выразится дробным числом и необходимо мотать катушечные группы с неодинаковым числом катушек. Кроме того для двухъярусной обмотки:

$$n\text{п} = 2q - 1 \text{ и } n'\text{п} = 2q + 1$$

7. Условия симметрии и выполнимости обмотки:

$$\frac{z}{m} \qquad \frac{n\text{к}}{a \times m} \qquad M = \frac{p}{a \times d}$$

$$a°\text{эл}_{I,II} = a°\text{эл}_{II,III} = \gamma°\text{эл} \times nz$$

$$\text{где } nz = \text{целому числу а: } \gamma°\text{эл} = \frac{360° \times p}{z}$$

Пример 1. Составить схему однослойной простой двухъярусной катушечной обмотки для z = 24, $2p$ = 4, m = 3, a = 2. Находим:

$$n\text{к} = m \times p = 3 \times 2 = 6$$

$$q = \frac{z}{2p \times m} = \frac{24}{4 \times 3} = 2 \quad n\text{п} = \frac{z}{n\text{к}} = \frac{24}{6} = 4$$

Условия выполнимости и симметрии:

$$\frac{z}{m} = \frac{24}{3} = 8 \qquad \frac{n\text{к}}{a \times m} = \frac{6}{2 \times 3} = 1 \quad M = \frac{p}{a \times d} = \frac{2}{2 \times 1} = 1$$

$$nz = \frac{a°\text{эл}}{\gamma°\text{эл}} = \frac{120°}{30°} = 4 \quad \gamma°\text{эл} = \frac{360° \times p}{z} = \frac{360° \times 2}{24} = 30°$$

H_{I} = 1, H_{II} = 1 + 4 = 5 и H_{III} = 1 + 2 × 4 = 9

т. е. обмотка выполнима, (рис. 53).

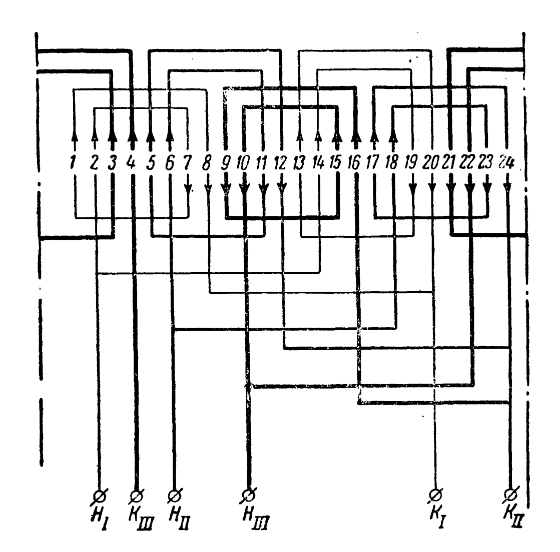


Рис. 53. Схема однослойной катушечной обмотки z = 24, 2p = 4. m = 3, q = 2, a = 2.

Пример 2. Составить схему однослойной простой двухъярусной катушечной обмотки для z = 18, 2p= 4, m = 3 и a = 1. Находим:

$$n\text{к} = m \times p = 3 \times 2 = 6 \quad q = \frac{z}{2p \times m} = \frac{18}{4 \times 3} = 1½\ (d = 2)$$

$$n\text{п} = 2q - 1 = 2 \times 1{,}5 - 1 = 2 \quad n\text{п} = 2q + 1 = 2 \times 1{,}5 + 1 = 4$$

Условия симметрии и выполнимости:

$$\frac{z}{m} = \frac{18}{3} = 6 \quad \frac{n\text{к}}{a \times m} = \frac{6}{1 \times 3} = 2 \quad M = \frac{p}{a \times d} = \frac{2}{1 \times 2} = 1$$

т. е. обмотка выполнима:

$$\gamma°\text{эл} = \frac{360° \times p}{z} = \frac{360° \times 2}{18} = 40° \quad nz = \frac{a°\text{эл}}{\gamma°\text{эл}} = \frac{240°}{40°} = 6$$

т. е. берём 120° зону и порядок чередования фаз: Iф. – IIIф. – IIф. (рис. 54).

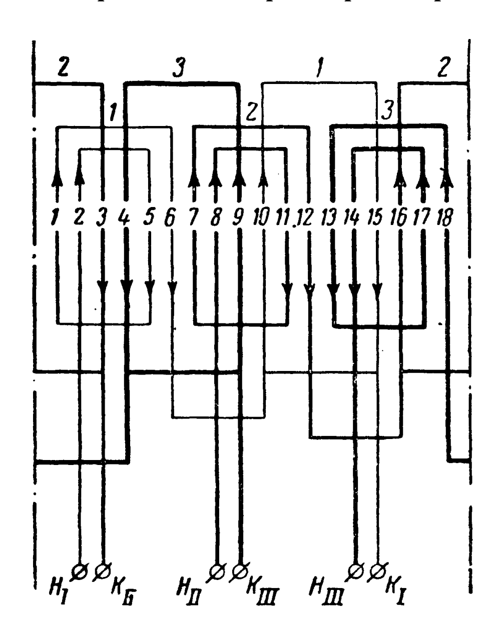


Рис. 54. Схема однослойной катушечной обмотки z = 18, 2p = 4, m = 3, q = 2, a = 1.

Пример 3. Составить схему однослойной простой двухъярусной катушечной обмотки для $z = 45$, $2p = 6$, $m = 3$ и $a = 1$. Находим:

$$nк = m \times p = 3 \times 3 = 9 \quad q = \frac{z}{2p \times m} = \frac{45}{6 \times 3} = 2½\ (d = 2)$$

$$nп = 2q - 1 = 2 \times 2{,}5 - 1 = 4 \quad nп = 2q + 1 = 2 \times 2{,}5 + 1 = 5$$

Условия симметрии и выполнимости:

$$\frac{z}{m} = \frac{45}{3} = 15 \quad \frac{nк}{a \times m} = \frac{9}{1 \times 3} = 3 \quad M = \frac{p}{a \times d} = \frac{3}{1 \times 2} = 1{,}5$$

т. е. обмотка невыполнима, но применяя искусственный метод намотки можно осуществить схему катушки 2 и 3 на сторону, а в 1 и 9 катушках мотать по полпаза в пазах 2, 3, 42 и 43;

$$\gamma°эл = \frac{360° \times p}{z} = \frac{360° \times 3}{45} = 24° \quad и \quad nz = \frac{a°эл}{\gamma°эл} = \frac{480°}{24°} = 20$$

$H_I = 1$, $H_{II} = 1 + 20 = 21$ и $H_{III} = 1 + 2 \times 20 = 41$ зона шестидесятиградусная (рис. 55).

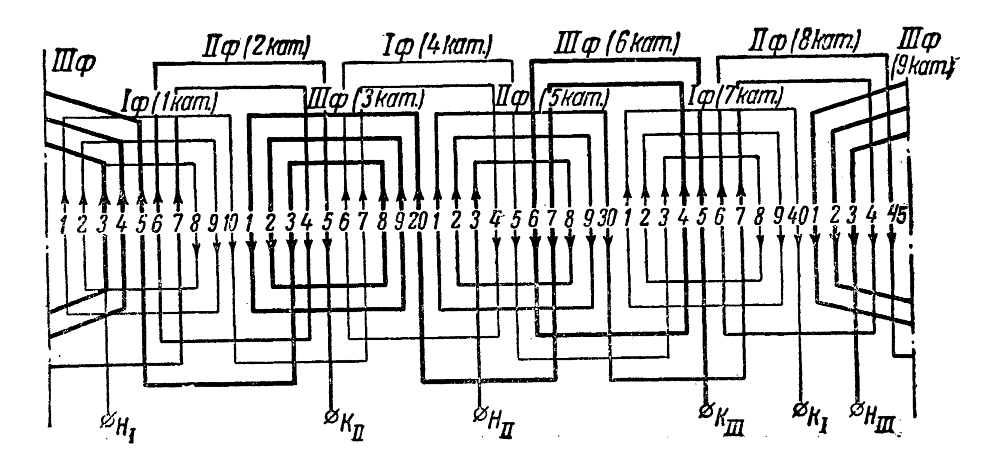


Рис. 55. Схема однослойной катушечной обмотки, $z = 45$, $2p = 6$, $m = 3$, $q = 2½$, $a = 1$.

Пример 4. Составить схему однослойной простой трехъярусной катушечной обмотки для $z = 12$, $2p = 2$, $m = 3$, $a = 1$ (рис. 56, а) и $a = 2$ (рис. 56, б). Находим:

$$nк = m \times p = 3 \times 1 = 3$$

но для намотки "вразвалку" берем $nк = 6$, т. е. мотаем полукатушками;

$$q = \frac{z}{2p \times m} = \frac{12}{2 \times 3} = 2\ (\text{при } nк = 6, q = 1)$$

$$nп = 2q = 2 \times 2 = 4$$

Условия симметрии и выполнимости:

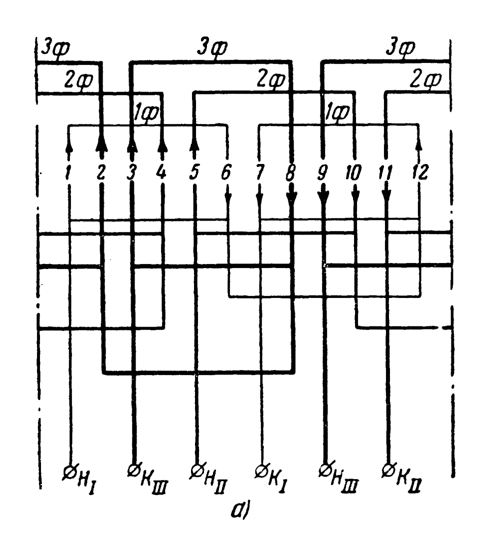
$$\frac{z}{m} = \frac{12}{3} = 4 \quad \frac{nк}{a \times m} = \frac{6}{1 \times 3} = 2 \quad и \quad \frac{nк}{a \times m} = \frac{6}{2 \times 3} = 1$$

$$M = \frac{2p}{a \times d} = \frac{2}{1 \times 1} = 2 \quad и \quad M = \frac{p}{a \times d} = \frac{2}{2 \times 1} = 1$$

Для $M = 2p/a \times d$ берем такое же выражение, как и для двухслойной секционной обмотки, ввиду увеличения числа катушек, т. е. обмотки выполнимы.

$$\gamma°эл = \frac{360° \times p}{z} = \frac{360° \times 1}{12} = 30° \quad и \quad nz = \frac{a°эл}{\gamma°эл} = \frac{120°}{30°} = 4$$

(рис. 56).



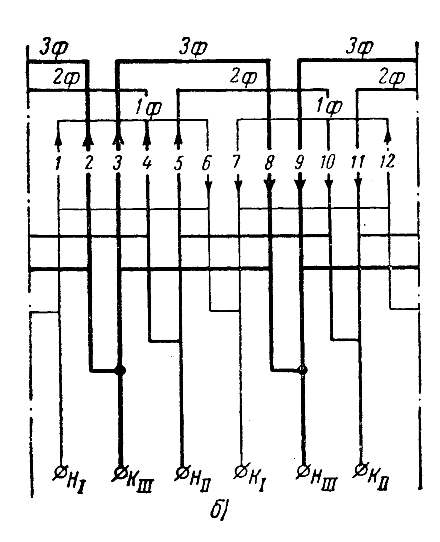


Рис. 56. Схема однослойной трехъярусной катушечной обмотки.
а) $z = 12$, $2p = 2$, $m = 3$, $q = 2$, $a = 1$; б) $z = 12$, $2p = 2$, $m = 3$, $q = 2$, $a = 2$.

Пример 5. Составить схему однослойной простой трехъярусной катушечной обмотки для $z = 30$, $2p = 2$, $m = 3$ и $a = 1$.

Находим:

$$nк = m \times p = 3 \times 1 = 3$$

т. е. берем $nк = 6$ полукатушек:

$$q = \frac{z}{2p \times m} = \frac{30}{2 \times 3} = 5$$

т. е. берем:

$$q = 2{,}5 \; (q = 2 \text{ и } q = 3) \quad nп = 2 \times q = 2 \times 5 = 10$$

Условия симметрии и выполнимости:

$$\frac{z}{m} = \frac{30}{3} = 10 \quad \frac{nк}{a \times m} = \frac{6}{1 \times 3} = 2$$

$$M = \frac{2p}{a \times d} = \frac{2}{1 \times 1} = 2 \quad \gamma°эл = \frac{360° \times p}{z} = \frac{360° \times 1}{30} = 12° \quad nz = \frac{a°эл}{\gamma°эл} = \frac{120°}{12°} = 10$$

$$H_{I} = 1,\ H_{II} = 1 + 10 = 11 \text{ и } H_{III} = 1 + 2 \times 10 = 21$$

т. е. обмотка выполнима (рис. 57).

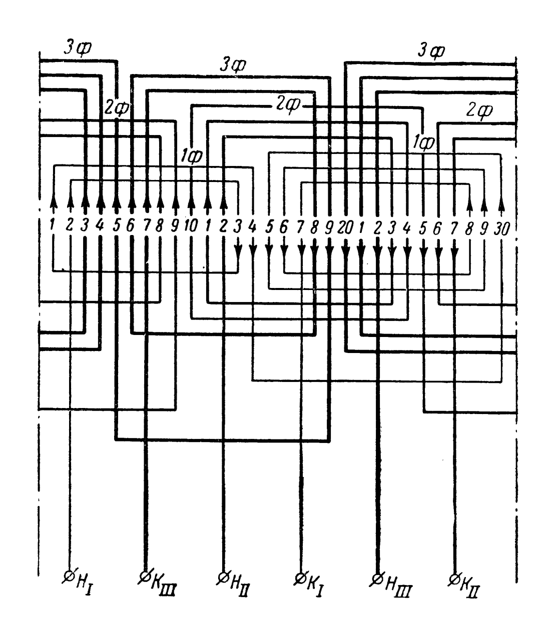


Рис. 57. Схема однослойной трехъярусной катушечной обмотки.
z = 30, $2p$ = 2, m = 3, q = 5, a = 1.

Пример 6. Составить схему однослойной простой катушечной двухъярусной обмотки для z = 36, $2p$ = 6, m = 2 и a = 1. Находим:

$$n\text{к} = m \times p = 2 \times 3 = 6$$

берем nк = 12 полукатушек для получения сдвига 90°

$$q = \frac{z}{2p \times m} = \frac{36}{6 \times 2} = 3$$

то есть берем:

$$q = 1{,}5$$

$$n\text{п} = 2 \times q - 1 = 2 \times 1{,}5 - 1 = 2,$$

$$n\text{п} = 2 \times q + 1 = 2 \times 1{,}5 + 1 = 4$$

Условия симметрии и выполнимости:

$$\frac{z}{m} = \frac{36}{2} = 18 \quad \frac{n\text{к}}{a \times m} = \frac{6}{1 \times 2} = 3$$

$$M = \frac{2p}{a \times d} = \frac{6}{1 \times 1} = 6 \quad \gamma°\text{эл} = \frac{360° \times p}{z} = \frac{360° \times 3}{36} = 30° \quad nz = \frac{a°\text{эл}}{\gamma°\text{эл}} = \frac{90°}{30°} = 3$$

$$H_{\text{I}} = 1 \quad \text{и} \quad H_{\text{II}} = 1 + 3 = 4$$

т. е. обмотка выполнима.

На рис. 58, а приведена правильная схема, а на рис. 58 б – неверно составленная схема.

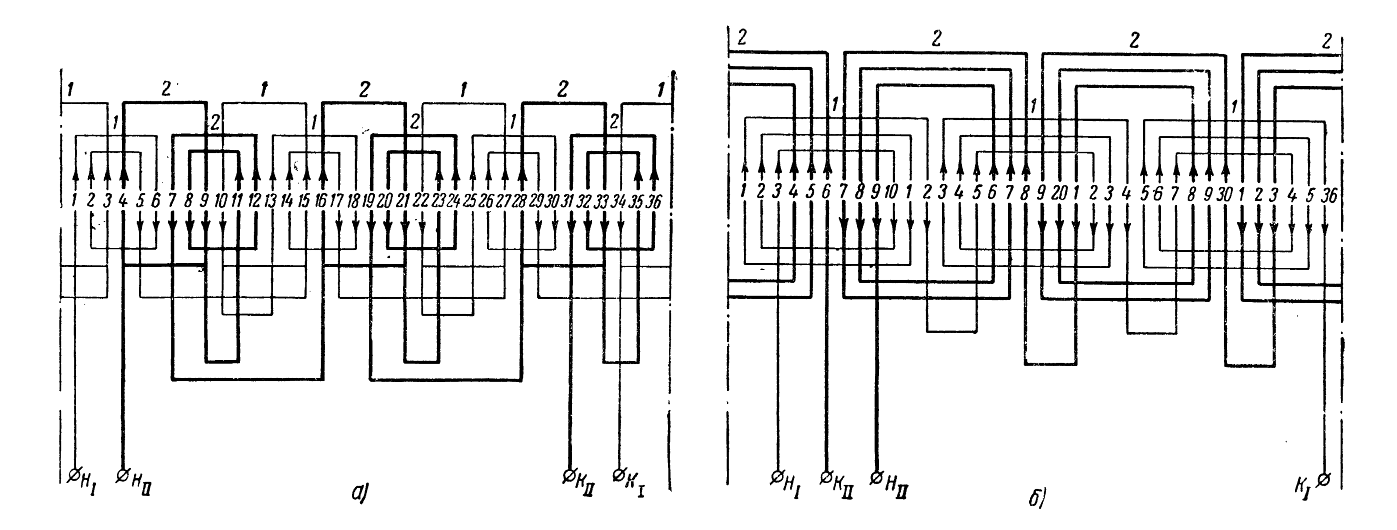


Рис. 58. Схема однослойной катушечной двухъярусной обмотки
$z = 36$, $2p = 6$, $m = 2$, $q = 3$, $a = 1$. а – правильная схема; б – неправильная схема.

Пример 7. Составить схему катушечной двухъярусной двухфазной обмотки для:
$z = 24$, $2p = 4$, $m = 2$ и $a = 1$.

Определяем: $n\text{к} = m \times p = 2 \times 2 = 4$, т. е. берем $n\text{к} = 8$ полукатушек.

$$q = \frac{z}{2p \times m} = \frac{24}{4 \times 2} = 3, \qquad \text{т. е. берем } q = 1{,}5 \quad (q = 1 \text{ и } q = 2)$$

откуда:

$$n\text{п} = 2q - 1 = 2 \times 1{,}5 - 1 = 2 \quad n\text{п} = 2q + 1 = 2 \times 1{,}5 + 1 = 4$$

Условия симметрии:

$$\frac{z}{m} = \frac{24}{2} = 12 \quad \frac{n\text{к}}{a \times m} = \frac{8}{1 \times 2} = 4$$

$$M = \frac{2p}{a \times d} = \frac{4}{1 \times 2} = 2 \quad \gamma°\text{эл} = \frac{360° \times p}{z} = \frac{360° \times 2}{24} = 30° \quad nz = \frac{a°\text{эл}}{\gamma°\text{эл}} = \frac{90°}{30°} = 3$$

$H_{\text{I}} = 1$ и $H_{\text{II}} = 1 + 3 = 4$ т. е. обмотка выполнима (рис. 59).

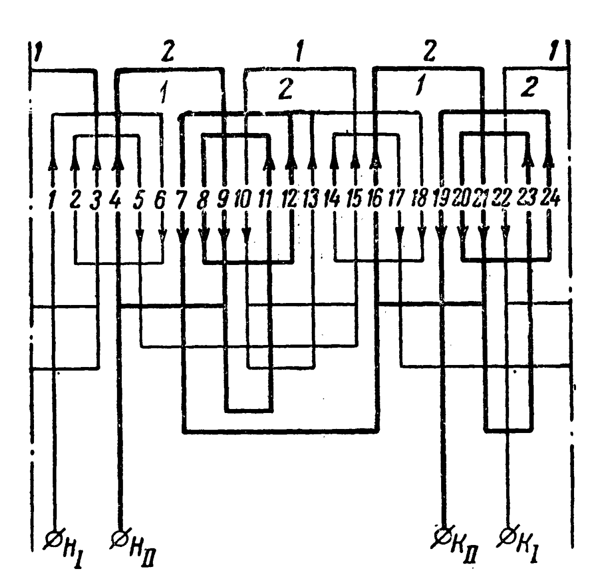


Рис. 59. Схема однослойной катушечной обмотки $z = 24$, $2p = 4$, $m = 2$, $q = 3$, $a = 1$.

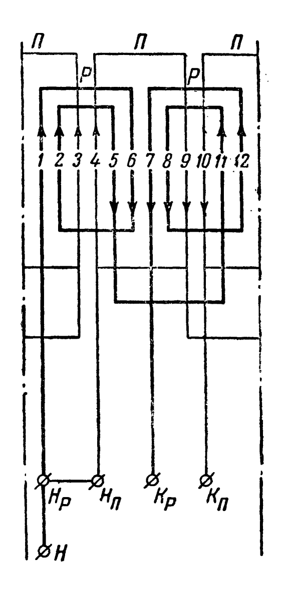


Рис. 60. Схема однослойной катушечной обмотки.
$z = 12$, $2p = 2$, $m = 1$, $q\text{р} = 4$, $q\text{п} = 2$, $a = 1$.

Пример 8. Составить схему однофазной двухъярусной обмотки для:
$z = 12$, $2p = 2$, $m = 1$ и $a = 1$.

Определяем: nк.р $= m \times p = 1 \times 1 = 1$, т. е. берем nк.р.п = 2 полукатушек;

$$z\text{р} = \frac{2}{3} \times z = \frac{2}{3} \times 12 = 8, \qquad z\text{п} = \frac{1}{3} \times z = \frac{1}{3} \times 12 = 4$$

$$q\text{р} = \frac{z\text{р}}{2p \times m} = \frac{8}{2 \times 1} = 4, \qquad \text{то есть берем: } q\text{р} = 2$$

$$q\text{п} = \frac{z\text{п}}{2p \times m} = \frac{4}{2 \times 1} = 2, \qquad \text{то есть берем: } q\text{п} = 1$$

$$n\text{п. р} = 2 \times q\text{п} = 2 \times 1 = 2, \qquad n\text{п. п} = 2 \times q\text{р} = 2 \times 2 = 4$$

Условия симметрии и выполнимости:

$$\frac{n\text{к. р. п}}{a \times m} = \frac{2}{1 \times 1} = 2$$

$$M = \frac{2p}{a \times d} = \frac{2}{1 \times 1} = 2 \quad \gamma°\text{эл} = \frac{360° \times p}{z} = \frac{360° \times 1}{12} = 30° \quad nz = \frac{a°\text{эл}}{\gamma°\text{эл}} = \frac{90°}{30°} = 3$$

$$H_{\text{I}} = 1 \quad \text{и} \quad H_{\text{II}} = 1 + 3 = 4$$

т. е. обмотка выполнима (рис. 60).

41. Составление схем однослойных секционных обмоток.

Однослойные секционные обмотки по степени сложности составления почти ничем не отличаются от простых катушечных обмоток. Для осуществления схем необходимы следующие данные:

1. Число полюсов двигателя $2p$.
2. Число фаз m.
3. Число пазов z.
4. Число катушек секции:

$$n\text{к. с} = \frac{z}{2}$$

5. Число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{z}{2p \times m}$$

6. Шаг обмотки по пазам:

$$y\text{п} = \frac{z}{2p}$$

7. Условия симметрии:

$$\frac{n\text{к. с}}{a \times m} = \text{целому числу} \quad \frac{z}{m} = \text{целому числу}$$

$$M = \frac{2p}{a \times d} = \text{целому числу (для цепной обмотки)}$$

$$M = \frac{p}{a \times d} = \text{целому числу (для обмотки с чередующимися шагами)}$$

$$a°\text{эл.}_{I,II} = a°\text{эл.}_{II,III} = \gamma°\text{эл} \times nz$$

Пример 1. Составить схему однослойной секционной обмотки (цепной), если дано: $z = 24$, $2p = 4$, $m = 3$ и $a = 1$. Находим:

$$n\text{к.с} = \frac{z}{2} = \frac{24}{2} = 12 \quad \text{и} \quad n\text{к} = m \times p = 3 \times 2 = 6$$

где:

$$n\text{к.с} > n\text{к (больше в два раза)}$$

$$q = \frac{z}{2p \times m} = \frac{24}{4 \times 3} = 2 \quad y\text{п} = \frac{z}{2p} = \frac{24}{4} = 6 \;\; (1 - 6)$$

Условия симметрии и выполнимости:

$$\frac{z}{m} = \frac{24}{3} = 8 \quad \frac{n\text{к.с}}{a \times m} = \frac{12}{1 \times 3} = 4$$

$$M = \frac{2p}{a \times d} = \frac{4}{1 \times 1} = 1$$

$$\gamma°\text{эл} = \frac{360° \times p}{z} = \frac{360° \times 2}{24} = 30°$$

$$nz = \frac{a°\text{эл}}{\gamma°\text{эл}} = \frac{120°}{30°} = 4$$

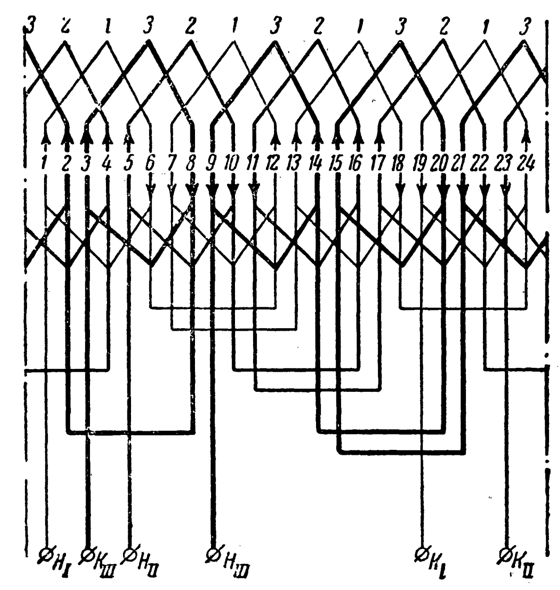


Рис. 61. Схема однослойной секционной обмотки. $z = 24$, $2p = 4$, $q = 2$, $m = 3$, $a = 1$.

$$H_{\text{I}} = 1,\; H_{\text{II}} = 1 + 4 = 5,\; H_{\text{III}} = 1 + 2 \times 4 = 9$$

то есть обмотка выполнима (рис. 61).

Пример 2. Составить схему однослойной секционной обмотки с чередующимися шагами, если дано: $z = 18$, $2p = 2$, $m = 3$ и $a = 1$. Определяем:

$$n\text{к.с} = \frac{z}{2} = \frac{18}{2} = 9 \quad \text{и} \quad n\text{к} = m \times p = 3 \times 1 = 3$$

nк.с > nк в 3 раза – только можно осуществить намотку с чередующимися шагами.

$$A + B = \frac{z}{m} = \frac{18}{3} = 6 \qquad A = B = 3$$

$$q = \frac{z}{2p \times m} = \frac{18}{2 \times 3} = 3 \quad y\text{п} = \frac{z}{2p} = \frac{18}{2} = 9 \;\; (1 - 10 \text{ и } 1 - 8\; (2 - 9)$$

Условия симметрии и выполнимости:

$$\frac{z}{m} = \frac{18}{3} = 6 \quad \frac{n\text{к.с}}{a \times m} = \frac{9}{1 \times 3} = 3 \quad M = \frac{p}{a \times d} = \frac{1}{1 \times 1} = 1$$

так как катушечно–секционная обмотка:

$$\gamma°\text{эл} = \frac{360° \times p}{z} = \frac{360° \times 1}{18} = 20° \quad nz = \frac{a°\text{эл}}{\gamma°\text{эл}} = \frac{120°}{20°} = 6$$

$H_{\text{I}} = 1$, $H_{\text{II}} = 1 + 6 = 7$, $H_{\text{III}} = 1 + 2 \times 6 = 13$ т. е. обмотка выполнима (рис. 62).

$$1 + H_{III} = 1 + 2 \times 6 = 13$$

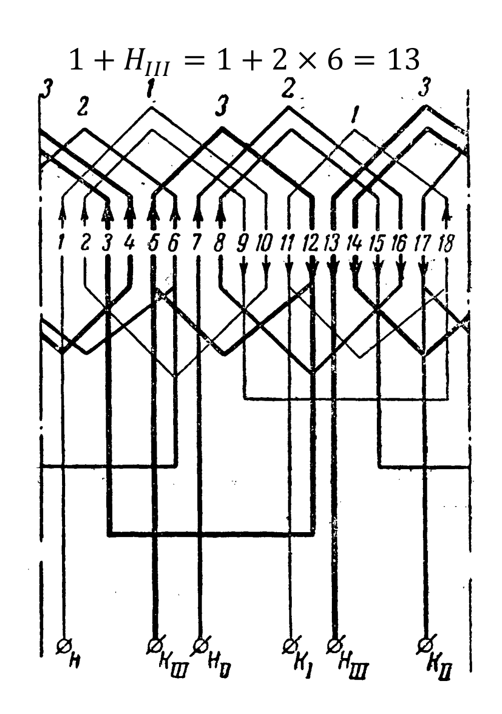


Рис. 62. Схема однослойной секционной обмотки.
z = 18, 2p = 2, m = 3, q = 3, a = 1.

Пример 3. Составить однослойную секционную обмотку с чередующимися шагами и с дробным числом пазов на полюс–фазу, если дано: z = 18, 2p = 4, m = 3, a = 1. Найдем:

$$n\text{к.с} = \frac{z}{2} = \frac{18}{2} = 9$$

$$n\text{к} = m \times p = 3 \times 2 = 6 \text{ т.е.} \quad n\text{к.с} > n\text{к в 1,5 раза}$$

$$A + B = \frac{z}{m} = \frac{18}{3} = 6 \quad A = 3 \text{ и } B = 3$$

$$q = \frac{z}{2p \times m} = \frac{18}{4 \times 3} = 1{,}5 \quad y\text{п} = \frac{z}{2p} = \frac{18}{4} = 4{,}5 \quad \text{т.е.} \quad 1 - 1 \text{ и } 1 - 6$$

Условия симметрии:

$$\frac{z}{m} = \frac{18}{3} = 6 \quad \frac{n\text{к.с}}{a \times m} = \frac{9}{1 \times 3} = 3$$

$$M = \frac{p}{a \times d} = \frac{2}{1 \times 1} = 2$$

$$\gamma^{\circ}\text{эл} = \frac{360^{\circ} \times p}{z} = \frac{360^{\circ} \times 2}{18} = 40^{\circ}$$

$$nz = \frac{a^{\circ}\text{эл}}{\gamma^{\circ}\text{эл}} = \frac{120^{\circ}}{40^{\circ}} = 3$$

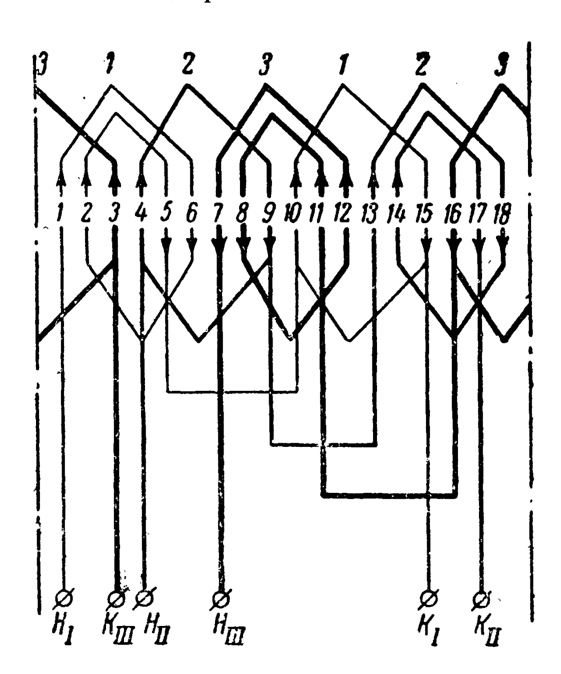


Рис. 63. Схема однослойной секционной обмотки.
z = 18, 2p = 4, m = 3, q = 1½, a = 1.

$$H_I = 1, H_{II} = 1 + 3 = 4, H_{III} = 1 + 2 \times 3 = 7$$

т. е. обмотка выполнима (рис. 63).

42. Составление схем двухслойных секционных петлевых и волновых обмоток.

Составление схем двухслойных секционных обмоток, особенно с дробным числом пазов на полюс и фазу, сложнее, чем простых катушечных, так как размещение и чередование катушечных групп требуют более внимательного подхода. Для намотки двухслойных секционных обмоток необходимы следующие данные:
1. Число полюсов двигателя $2p$.
2. Число фаз m.
3. Число пазов (равно числу секций) z.
4. Число катушечных групп $n\text{к} = 2p \times m$.
5. Число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{z}{2p \times m}$$

6. Шаг обмотки по пазам нормальный:

$$y\text{п} = \frac{z}{2p}$$

укороченный шаг:

$$y'\text{п} \approx 0{,}8 \times y\text{п} \quad \text{или} \quad y'\text{п} = \beta \times y\text{п}$$

7. Для дробного числа пазов на полюс и фазу:

$$q = b + \frac{c}{d}$$

число цифр в ряду d, сумма цифр в ряду $N\text{р} = b \times d + c$ и число рядов обмотки:

$$n\text{р} = \frac{2p \times m}{d}$$

если знаменатель дроби не кратный трем.

При знаменателе дроби, кратном трем, число рядов обмотки:

$$n\text{р} = \frac{z}{N\text{р}} - D$$

и сумма цифр в ряду:

$$N\text{р} = b \times (d + 1) + c \quad \text{для} \quad \frac{c}{d} = \frac{1}{3} < \frac{1}{2}$$

$$N\text{р} = b \times (d + 1) + (c + 1) \quad \text{для} \quad \frac{c}{d} = \frac{2}{3} > \frac{1}{2}$$

Число цифр в ряду $d + 1$.
Сумма цифр в добавочном ряду $N\text{д} = z - n\text{р} \times N\text{р}$

8. Условия симметрии и выполнимости:

$$\frac{z}{m} = \text{целому числу} \quad \frac{n\text{к}}{a \times m} = \text{целому числу}$$

$$M = \frac{2p}{a \times d} = \text{целому числу} \quad a^\circ\text{эл}_{I,II} = a^\circ\text{эл}_{II,III} = \gamma^\circ\text{эл} \times nz$$

Пример 1. Составить схему двухслойной секционной обмотки с укорочением шага, если дано: z = 18, $2p$ = 2, m = 3 и a = 1.

Находим:

$$nк = 2p \times m = 2 \times 3 = 6 \quad yп = \frac{z}{2p} = \frac{18}{2} = 9$$

$$q = \frac{z}{2p \times m} = \frac{18}{2 \times 3} = 3 \quad \beta = \frac{yп - пy}{yп} = \frac{9 - 2}{9} = 0{,}78$$

(берем пу = 2), укороченный шаг y'п – yп – пу = 7 (1 – 8).
Условия симметрии и выполнимости:

$$\frac{z}{m} = \frac{18}{3} = 6 \quad \frac{nк}{a \times m} = \frac{6}{1 \times 3} = 2 \quad M = \frac{2p}{a \times d} = \frac{2}{(1 \times 1)} = 2$$

$$\gamma°эл = \frac{360° \times p}{z} = \frac{360° \times 1}{18} = 20° \quad nz = \frac{a°эл}{\gamma°эл} = \frac{120°}{20°} = 6$$

$$H_I = 1 \quad H_{II} = 1 + 6 = 7 \quad H_{III} = 1 + 2 \times 6 = 13$$

то есть обмотка выполнима (рис. 64).

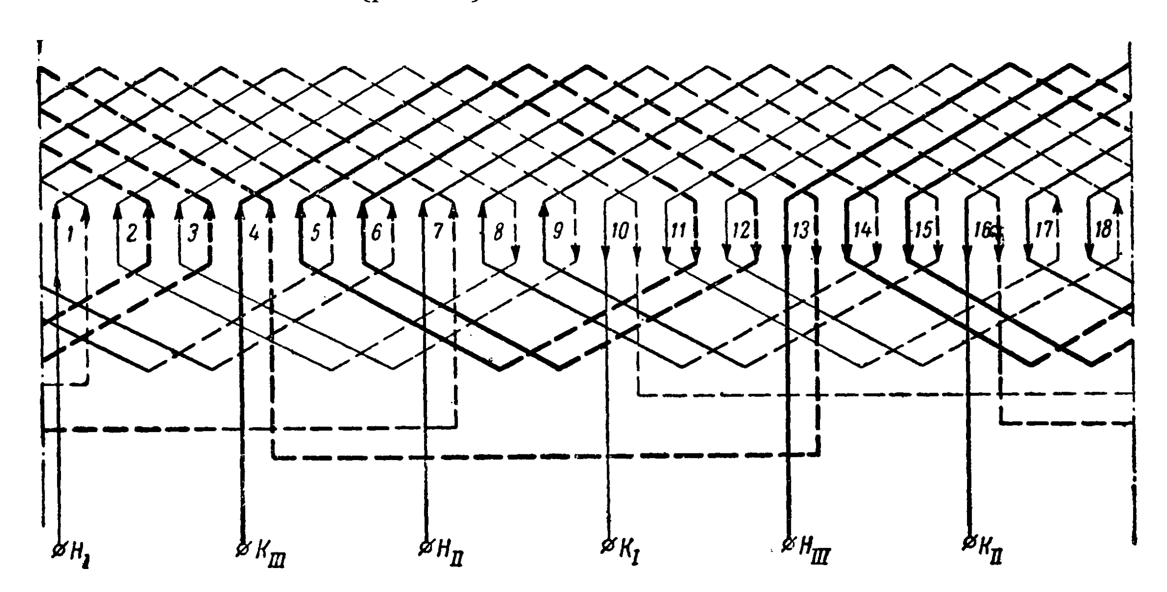


Рис. 64. Схема двухслойной секционной обмотки. z = 18, $2p$ = 2, m = 3, q = 3, a = 1.

Пример 2. Составить схему однофазной двухслойной обмотки, если дано:
z = 24, $2p$ = 4, m = 1 и a = 1. Находим:

$$nк.п = nк.р = 2p \times m = 4 \times 1 = 4$$

$$zр = \frac{2}{3} \times z = \frac{2}{3} \times 24 = 16 \quad zп = \frac{1}{3} \times z = \frac{1}{3} \times 24 = 8$$

$$qр = \frac{zр}{2p \times m} = \frac{16}{4 \times 1} = 4 \quad qп = \frac{zп}{2p \times m} = \frac{8}{4 \times 1} \times 1 = 2 \quad yп = \frac{z}{2p} = \frac{24}{4} = 6$$

$$\text{укороченный шаг: } y'п \approx 0{,}8 \times yп = 0{,}8 \times 6 = 4{,}8 \approx 5\ (1 - 6) \quad \beta = \frac{y'п}{yп} = \frac{5}{6} = 0{,}833$$

Условия симметрии и выполнимости:

$$\frac{z\text{р}}{m} = \frac{16}{1} = 16 \quad \frac{z\text{п}}{m} = \frac{8}{1} = 8 \quad \frac{n\text{к}}{a \times m} = \frac{4}{1 \times 1} = 4$$

$$M = \frac{2p}{a \times d} = \frac{4}{1 \times 1} = 4 \quad \gamma°\text{эл} = \frac{360° \times p}{z} = \frac{360° \times 2}{24} = 30° \quad nz = \frac{a°\text{эл}}{\gamma°\text{эл}} = \frac{90°}{30°} = 3$$

$H\text{р} = 1 \quad H\text{п} = 1 + 3 = 4$ т. е. обмотка выполнима (рис. 65).

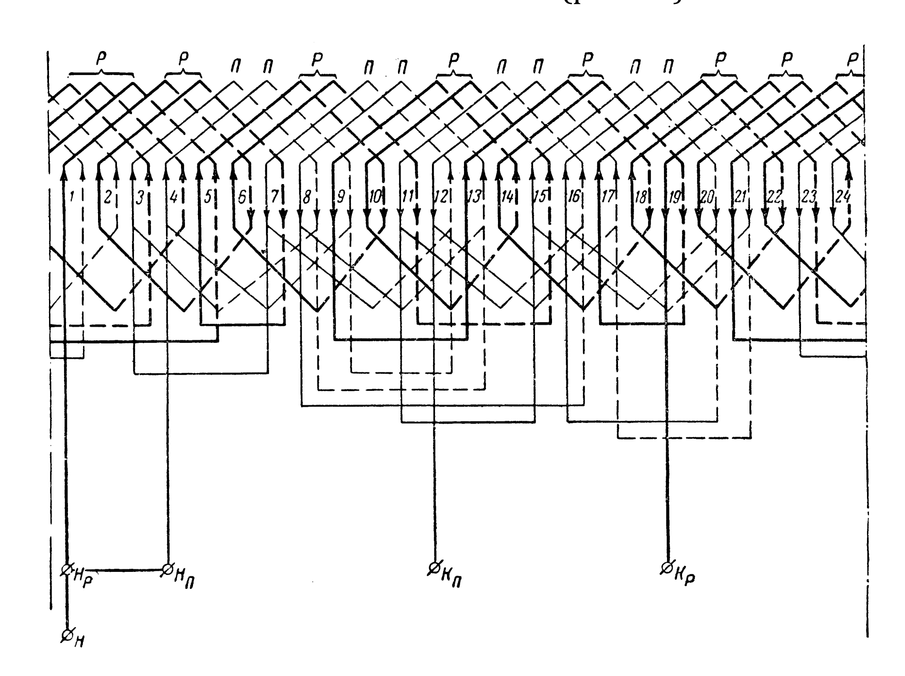


Рис. 65. Схема двухслойной секционной обмотки z = 24, $2p$ = 4, m = 1, qр = 4, qп = 2, a = 1

Пример 3. Составить схему двухфазной двухслойной обмотки с укорочением шага, если дано: z = 12, $2p$ = 2, m = 2 и a = 1.

Находим:

$$n\text{к} = 2p \times m = 2 \times 2 = 4$$

$$q = \frac{z}{2p \times m} = \frac{12}{2 \times 2} = 3 \quad y\text{п} = \frac{z}{2p} = \frac{12}{2} = 6$$

укороченный шаг:

$$y'\text{п} \approx 0{,}8 \times y\text{п} = 0{,}8 \times 6 = 4{,}8 \approx 5\ (1-6) \quad \beta = \frac{y'\text{п}}{y\text{п}} = \frac{5}{6} = 0{,}833$$

Условия симметрии и выполнимости:

$$\frac{z}{m} = \frac{12}{2} = 6 \quad \frac{n\text{к}}{a \times m} = \frac{4}{1 \times 2} = 2$$

$$M = \frac{2p}{a \times d} = \frac{2}{1 \times 1} = 2 \quad \gamma°\text{эл} = \frac{360° \times p}{z} = \frac{360° \times 1}{12} = 30° \quad nz = \frac{a°\text{эл}}{\gamma°\text{эл}} = \frac{90°}{30°} = 3$$

$H_I = 1 \quad H_{II} = 1 + 3 = 4$ т. е. обмотка выполнима (рис. 66).

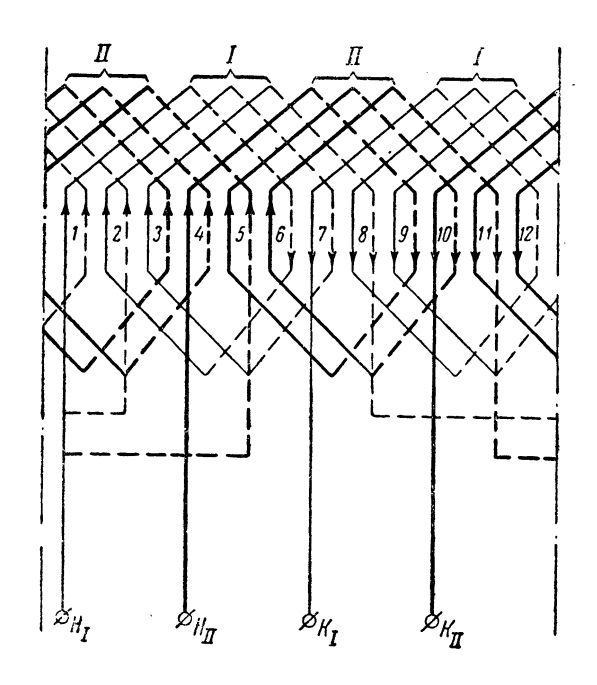


Рис. 66. Схема двухслойной секционной обмотки z = 12, $2p$ = 2, m = 2, q = 3, a = 1.

Пример 4. Дано: z = 15, $2p$ = 4, m = 3 a = 1. Требуется составить схему трехфазной двухслойной обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу. Находим:

$$n\text{к} = 2p \times m = 4 \times 3 = 12$$

$$q = \frac{z}{2p \times m} = \frac{15}{4 \times 3} = 1{,}25 \quad q = b + \frac{c}{d} = 1 + ¼ = 1{,}25$$

$$y\text{п} = \frac{z}{2p} = \frac{15}{4} = 3{,}75$$

укороченный шаг:

$$y'\text{п} \approx 0{,}8 \times y\text{п} = 0{,}8 \times 3{,}75 = 3\ (1-4), \quad \beta = \frac{y'\text{п}}{y\text{п}} = \frac{3}{3{,}75} = 0{,}8$$

число цифр в ряду: d = 4
сумма цифр в ряду:

$$N\text{р} = b \times d + c = 1 \times 4 + 1 = 5$$

число рядов обмотки:

$$n\text{р} = \frac{2p \times m}{d} = \frac{4 \times 3}{4} = 3$$

основной ряд цифр (1112), чередование катушечных групп обмотки:
(1112) (1112) (1112)

Условия симметрии и выполнимости:

$$\frac{z}{m} = \frac{15}{3} = 5 \qquad \frac{n\text{к}}{a \times m} = \frac{12}{1 \times 3} = 4$$

$$M = \frac{2p}{a \times d} = \frac{4}{1 \times 4} = 1 \quad \gamma°\text{эл} = \frac{360° \times p}{z} = \frac{360° \times 2}{15} = 48° \quad nz = \frac{a°\text{эл}}{\gamma°\text{эл}} = \frac{480°}{48°} = 10$$

$$H_I = 1 \ \ H_{II} = 1 + 10 = 11 \ \ H_{III} = 1 + 2 \times 10 = 21 \text{ или } H_{III} = 6$$

т. е. обмотка выполнима (рис. 67). Размещение обмотки по пазам представлено в табл. 21.

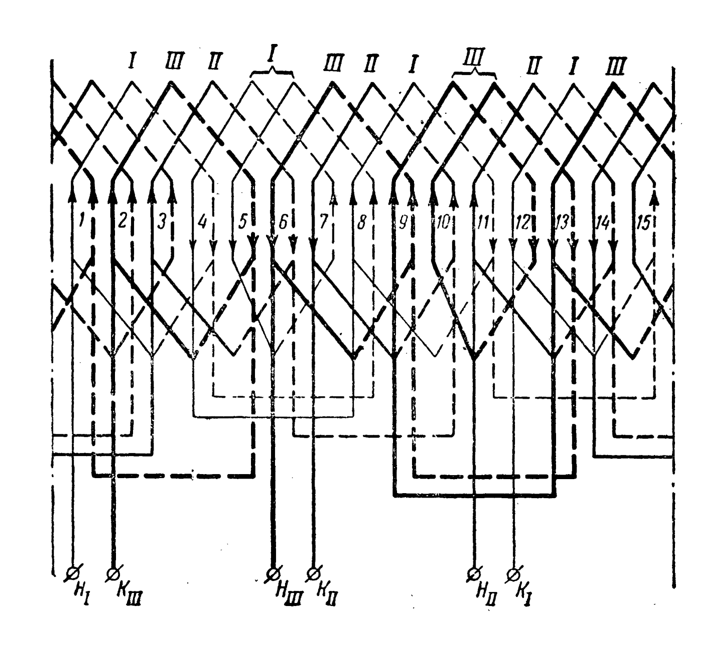


Рис. 67. Схема двухслойной секционной обмотки.
z = 15, 2p = 4, m = 3, q = 1¼, a = 1.

Таблица 21.

Число фаз/полюсов	I ф	III ф	II ф
I П	1*	1	1
II П	2	1***	1
III П	1	2	1**
IV П	1	1	2
$\frac{z}{m}$	5	5	5

*Начало первой фазы.
**Начало второй фазы.
***Начало третьей фазы.

Пример 5. Дано: z = 54, 2p = 6, m = 3, a = 1. Требуется составить стержневую волновую обмотку. Находим:

$$nк = 2p \times m = 6 \times 3 = 18 \quad q = \frac{z}{2p \times m} = \frac{54}{6 \times 3} = 3$$

$$yп = \frac{z}{2p} = \frac{54}{6} = 9\ (1 - 10)$$

Условия симметрии и выполнимости:

$$\frac{z}{m} = \frac{54}{3} = 18 \qquad \frac{nк}{a \times m} = \frac{18}{1 \times 3} = 6$$

$$M = \frac{2p}{a \times d} = \frac{6}{1 \times 3} = 2 \qquad \gamma°эл = \frac{360° \times p}{z} = \frac{360° \times 3}{54} = 20° \qquad nz = \frac{a°эл}{\gamma°эл} = \frac{120°}{20°} = 6$$

При 2p = 6 перемычки будут пересекаться.

Цифровая схема 1 ф.
1 – 10 – 19 – 28 – 37 – 46
2 – 11 – 20 – 29 – 38 – 47
3 – 12 – 21 – 30 – 39 – 48
$Н_I = 1$
$К_I = 10$
3 _________ 48 перемычка

откуда:

$$H_{II} = 1 + nz = 1 + 6 = 7 \qquad H_{III} = 1 + 2nz = 1 + 2 \times 6 = 13$$

$$K_{II} = nz + \left(1 + \frac{z}{2p}\right) = 6 + \left(1 + \frac{54}{6}\right) = 16 \quad K_{III} = 2nz + \left(1 + \frac{z}{2p}\right) = 2 \times 6 + 10 = 22$$

Перемычки:

$$I \text{ ф. от } 3 ________ 48, \text{где } q = 3 \text{ и } z\text{п} = 48$$

$$II \text{ ф. от } (q + nz) = (3 + 6) = 9 ______ (z\text{п} + nz) = (48 + 6) = 54$$

$$III \text{ ф. от } (q + 2nz) = (3 + 2 \times 6) = 15 _____ z\text{п} + 2 \times nz) = (48 + 2 \times 6) = 60 - 54 = 6$$

Итак:
I ф. от 3 ______ 48
II ф. от 9 ______ 54 } перемычки
III ф. от 15 _____ 6

(рис. 68).

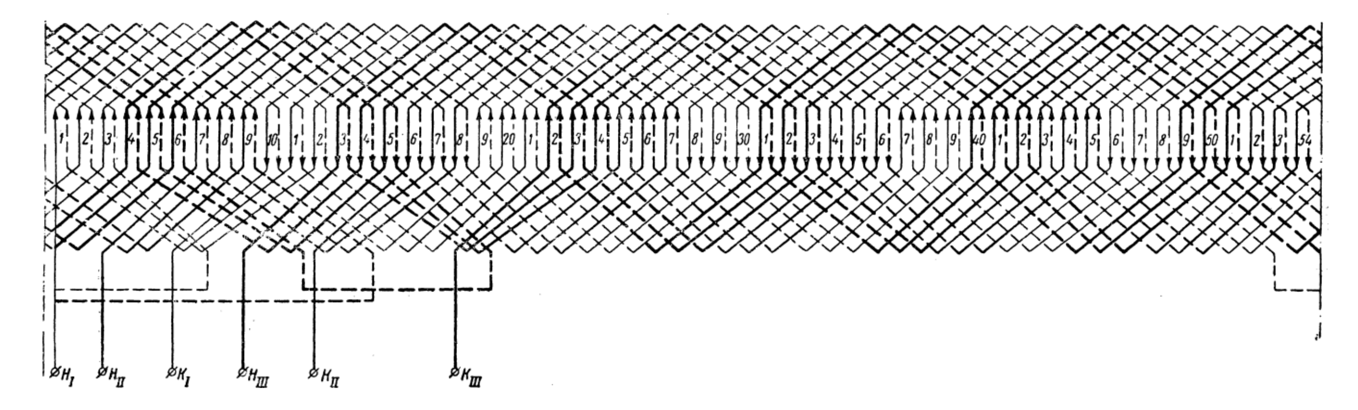


Рис. 68. Схема стержневой волновой двухслойной обмотки
z = 54, $2p$ = 6, m = 3, q = 3, a = 1.

Пример 6. Составить двухслойную стержневую– волновую обмотку с дробным числом пазов на полюс и фазу, если дано: z = 90, $2p$ = 12, m = 3 a = 1. Находим:

$$n\text{к} = 2p \times m = 12 \times 3 = 36 \quad q = \frac{z}{2p \times m} = \frac{90}{12 \times 3} = 2{,}5$$

$$q = b + \frac{c}{d} = 2 + ½ \quad y\text{п} = \frac{z}{2p} = \frac{90}{12} = 7{,}5$$

Берем два шага:

$$y\text{п} = 7\ (1 - 8) \quad y\text{п} = 8\ (1 - 9)$$

Условия симметрии и выполнимости:

$$\frac{z}{m} = \frac{90}{3} = 30 \qquad \frac{n\text{к}}{a \times m} = \frac{36}{1 \times 3} = 12$$

$$M = \frac{2p}{a \times d} = \frac{12}{1 \times 2} = 6 \quad \gamma°\text{эл} = \frac{360° \times p}{z} = \frac{360° \times 6}{90} = 24° \quad nz = \frac{a°\text{эл}}{\gamma°\text{эл}} = \frac{480°}{24°} = 20$$

(рис. 69).

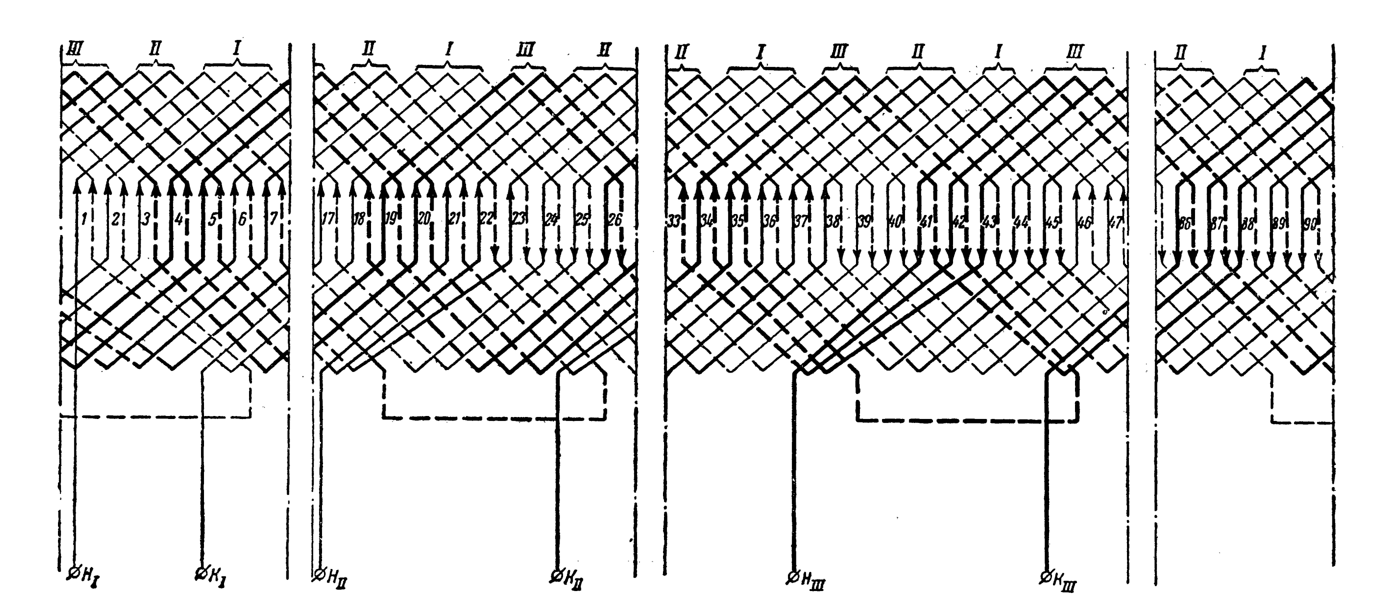


Рис. 69. Схема стержневой волновой двухслойной обмотки.
$z = 90$, $2p = 12$, $m = 3$, $q = 2½$, $a = 1$.

Глава четвертая
Пересчет асинхронных двигателей.
43. Электромагнитные нагрузки.

При реконструкции старых электростанций и сетей (изменение мощности, напряжения, частоты тока, числа фаз и т. д.) приходится изменять паспорта существующих машин, что достигается путем перемотки, а иногда и небольшой механической переделки. Так как некоторые заводские силовые сети переходят с 500 на 380 *в* или наоборот, то асинхронные двигатели требуется перематывать на соответствующие данные. Но бывают случаи, что необходимо по тем или иным соображениям изменить число оборотов двигателя, что повлечет за собой изменение мощности, или изменить мощность, что вынуждает получить другое число оборотов.

Как при изменении напряжения двигателя, так и числа оборотов, числа фаз, частоты тока и др. перемотка без технически правильного расчета не должна допускаться, так как неверные обмоточные данные и несоответствующий им паспорт не только отразятся на процессе работы самого двигателя, но и на сети, ухудшив ее cos φ.

Необходимо пересчитывать электрические машины и в том случае, если не требуется изменения паспорта, с целью проверки их электромагнитных нагрузок и подбора числа проводников и площади поперечного сечения в случае замены непригодной обмотки новой. Обмоточный провод является очень ценным материалом, поэтому при подборе обмотки приходится подсчитывать сечение провода, число параллельных проводников, число параллельных ветвей, что связано с изменением общего числа проводников в пазу статора или ротора.

Особенность пересчета машин переменного тока заключается в том, что подсчет индуктированной э. д. с. в статоре асинхронного двигателя производится с учетом обмоточного коэффициента, частоты тока и числа фаз. Кроме того, число оборотов асинхронных машин жестко связано с числом пар полюсов, тогда как в машинах постоянного тока число оборотов не зависит от числа полюсов.

При пересчете машин переменного тока оставляем неизменным магнитный поток при изменении напряжения, а следовательно, сохраняется отношение напряжения к числу эффективных витков в фазе:

$$\frac{U\text{ф}}{W\text{ф.эфф}} = \Phi$$

Изменение данного отношения допускается при перемотке не более, чем на ± 5%, иначе свойства электродвигателя ухудшатся (к. п. д., cos φ и перегрузочная способность). Незначительное отклонение новой обмотки от старой можно допускать не только в отношении изменения магнитного потока на ± 5 %, но также и плотности тока (изменение сечения проводников). Бо́льшее повышение электромагнитных нагрузок не рекомендуется, так как увеличенная магнитная индукция не только повышает нагрев, но и реактивную составляющую тока холостого хода. Последняя увеличивается в ненасыщенной машине при уменьшении числа эффективных витков в фазе на + 5% примерно на $(1{,}05)^2$ = 1,1, т. е. на 10%, а в насыщенной еще выше.
Величина реактивной составляющей тока холостого хода или намагничивающий ток отражается отрицательно на cos φ и к. п. д. двигателя.
При уменьшении сечения на 5% плотность тока возрастает также на 5%, а нагрев обмотки в $(1{,}05)^2$ = 1,1 раз, т. е. на 10%, что также неблагоприятно отзывается на нагреве машины.
Необходимо заметить, что уменьшение числа витков в фазе оказывает и положительное воздействие на двигатель, т. е. увеличивает максимальный момент вращения двигателя (перегрузочную способность), а также пусковой момент вращения и номинальный момент.

Из теории асинхронного двигателя известно, что:

$$M\text{вр} = k \times \Phi \times I_2^2 \text{ и } \quad M\text{макс} = \Phi^2$$

где: Φ – поток двигателя, *мкс*. I_2 – ток в роторе, *а*; k – конструктивный коэффициент двигателя. Для короткозамкнутых двигателей:

$$M\text{п} = \Phi^2$$

Перегрузочной способностью двигателя называется отношение максимального момента к номинальному. По ГОСТ 183–41 допускается: для трехфазных двигателей кратность перегрузочного момента:

$$k\text{м} = \frac{M\text{макс}}{M\text{н}} \geq 1{,}65 \div 1{,}8$$

где: 1,65 – для двигателей с короткозамкнутым ротором; 1,8 – для двигателей с фазным ротором; для однофазных двигателей:

$$k\text{м} = \frac{M\text{макс}}{M\text{н}} \geq 1{,}35 \div 1{,}65$$

где: 1,35 – для двигателей с короткозамкнутым ротором.
Пусть до перемотки трехфазного двигателя было kм = 1,8. После перемотки поток уменьшен в 1,1 раз, то Mмакс = Φ^2 в свою очередь понизится в $(1{,}1)^2$ =1,21 раза, а перегрузочная способность будет:

$$k\text{м} = \frac{1{,}8}{1{,}21} = 1{,}5$$

Полученный результат является нежелательным, так как при этом двигатель не "потянет" механизм, соответствующий мощности данного паспорта.
Линейную нагрузку (*AS*) и максимальную магнитную индукцию в воздушном зазоре (*Bl*) для асинхронных двигателей при пересчете можно брать из табл. 22 и 23.

Допустимая магнитная индукция:
в спинке статора: Ba_1= 14000 ÷ 17000 *гс*
в спинке ротора: Ba_2 = 10000 ÷ 16000 *гс*

Таблица 22. Выбор *AS* и *Bl* в асинхронных двигателях.

P, ква	*AS, а/см.*		*гс*
	2*p* = 4	2*p* = 6	
1	170	225	6100
5	240	320	6700
10	270	350	7200
50	370	425	7700
150	450	500	8300
300	500	525	8600

Таблица 23. Выбор *AS* и *Bl* в асинхронных двигателях.

Двигатели	*AS, а/см.*	*Bl, гс*
Малые до 5÷10 *квт*.	90÷250	5000÷7000
Большие до 500 *квт*.	300 и выше	7000÷11000
Свыше 500 *квт*.	500 и выше	7000÷11000

Максимальные допустимые индукции в зубцах:
а) статора Bz_1 макс < 15000 ÷ 21000 *гс* при *f* = 50 *гц*.
б) ротора Bz_2 макс < 16000 ÷ 22000 *гс*.

допускается плотность тока:
в обмотках статора: Δ1 = 3 ÷ 8 *а/мм*^{2}.
в обмотках ротора: Δ2 = 4,5 ÷ 8,5 *а/мм*^{2}.

В стержне короткозамкнутого ротора:
для медного Δ2 = 5 ÷ 7 *а/мм*^{2}.
для алюминиевого Δ2 – 2,5 ÷ 4,5 *а/мм*^{2}.

Плотность тока в короткозамкнутом кольце допускается выше на 15 ÷ 25%, ввиду лучших условий охлаждения, т. е. Δк = (1,15 ÷ 1,25) × Δ2.
Большие значения плотности тока относятся к машинам открытого исполнения с хорошей вентиляцией или к машинам с кратковременной нагрузкой, малые значения – к машинам закрытого исполнения или открытого – без вентиляторов. Проверять нагрев можно по фактору пропорционального перегрева:

$$\Delta t°C = AS \times \Delta \leq 1000 \div 2200$$

где меньшие пределы относятся к закрытым машинам, а большие – к вентилируемым.

44. Электродвижущие силы статора и ротора.

Наведенные э. д. с. в обмотках статора и ротора, как известно, зависят от магнитного потока, частоты тока и числа витков.
для статора:

$$E1 = 4{,}44 \times k\text{в} \times f1 \times fw1 \times \Phi \times W1 \times 10^{-8} \text{ в}$$

для ротора:

$$E2 = 4{,}44 \times k\text{в} \times f2 \times fw2 \times \Phi \times W2 \times 10^{-8} \text{ в}$$

где: $E1$ и $E2$ – э. д. с. статора и ротора; kв – коэффициент формы поля, равный для синусоиды 1,11; $f1$– частота тока в статоре по стандарту $f1$ = 50 *гц*.; . Ф – магнитный, поток в максвеллах *мкс*.; $W1$ и $W2$– числа витков на фазу в статоре и роторе; fw1 и fw2 – обмоточные коэффициенты статора и ротора (обычно fw1 и fw2 = 0,9 ÷ 1); $f2$ = $f1$ × s где: s – коэффициент скольжения, обычно равный 1,5 ÷ 6%. При режиме короткого замыкания $f1$ = $f2$. Так как падения напряжений в статоре и роторе при нагрузке незначительны, то магнитный поток двигателя:

$$\Phi \approx const, \text{а } E1\text{ф} \approx U1\text{ф и } E2\text{ф} \approx U2\text{ф}$$

45. Связь между э. д. с. и токами в статоре и роторе.

Так как в заторможенном состоянии асинхронный двигатель представляет собой трансформатор, то э. д. с. ротора зависит от э. д. с. статора и отношения чисел витков. Если значения э. д. с. статора и ротора поделим одно на другое, то получим:

$$\frac{E1\text{ф}}{E2\text{ф}} = \frac{4{,}44 \times f1 \times fw1 \times W1 \times 10^{-8}}{4{,}44 \times f2 \times fw2 \times W2 \times 10^{-8}} = \frac{f1 \times fw1 \times W1}{f2 \times fw2 \times W2}$$

но $f1$ = $f2$ при режиме короткого замыкания тогда:

$$\frac{E1\text{ф}}{E2\text{ф}} = \frac{fw1 \times W1}{fw2 \times W2} \quad \text{или } E2\text{ф} = E1\text{ф} \times \frac{fw2 \times W2}{fw1 \times W1} \quad \text{для } m1 = m2 \text{ и } E2\text{л} = E1\text{л} \times \frac{fw2 \times W2}{fw1 \times W1}$$

для $m1$ = $m2$ и одинакового соединения фаз , статора и ротора. Падение напряжения в обмотке статора можно брать по табл. 24.

Таблица 24. Относительное падение напряжения в статоре асинхронных двигателей в зависимости от мощности.

Мощность P, *квт*.	Относительное падение напряжения, *в* (ε)
0,1÷1,1	0,11÷0,06
1,1÷7,5	0,06÷0,04
7,6÷25	0,04÷0,03
26÷100	0,034÷0,02
101÷1000	~ 0,02
Свыше 1000	~ 0,015

Для приближенных расчетов можно пользоваться следующими формулами.
Фазовое напряжение при разомкнутых кольцах ротора:

$$U2\text{ф} \approx U1\text{ф} \times \frac{W2}{W1} \text{ для } m1 = m2 \quad \text{и} \quad U2\text{л} \approx U1\text{л} \times \frac{W2}{W1} \text{ для } m1 = m2$$

и одинакового соединения фаз статора и ротора, и соединения фаз статора в треугольник и соединения фаз ротора в звезду:

$$U2\text{л} \approx \sqrt{3} \times U\text{л}1 \times \frac{W2}{W1} \text{ для } m1 = m2$$

Для однофазного двигателя ($m1$ = 1):

$$U\text{л}2 = U\text{л}1 \times \frac{2 \times W2 \times fw1}{W1 \times fw2}$$

где Uл2 – максимальное напряжение между двумя кольцами ротора.

Числа витков на фазу статора и ротора:

$$W1 = \frac{z1 \times N\text{п}1}{2 \times m1} \;\text{ и }\; W2 = \frac{z2 \times N\text{п}2}{2 \times m2}$$

где: $z1$ и $z2$– числа пазов статора и ротора; $m1$ и $m2$ – числа фаз статора и ротора; $N\text{п}1$ и $N\text{п}2$ – числа эффективных проводов в пазах статора и ротора.
Для короткозамкнутого ротора:

$$E2\text{ф} = 0,5 \times \frac{E1\text{ф}}{fw1 \times W1} \;\text{ или }\; U2\text{ф} = 0,5 \times \frac{U1\text{ф}}{fw1 \times W1} \;\text{ так как } fw2 = 1 \text{ и } W2 = ½.$$

Зависимость тока ротора от тока статора выражается через отношение их эффективных витков, и так как число ампервитков ротора приблизительно меньше на $10 \div 15\%$ числа ампервитков статора, то ток одной фазы ротора будет:
для многофазного двигателя:

$$I2 = (0,85 \div 0,9) \times I1 \times \frac{fw1 \times W1 \times m1}{fw2 \times W2 \times m2}$$

для однофазного двигателя:

$$I2 = (0,85 \div 0,9) \times I1 \times \frac{fw1 \times W1}{2 \times fw2 \times W2}$$

где коэффициенты 0,9 и 0,85 учитывают уменьшение числа ампервитков ротора за счет тока холостого хода (0,9 для двигателей средней и большой мощности, а 0,85 – для малой мощности); коэффициент 2 в знаменателе формулы учитывает, что однофазная обмотка двигателя представляет собой как бы трехфазную обмотку, у которой одна фаза выключена, а две другие соединены последовательно, откуда общее число витков $W1$ приходится на две фазы, а для одной фазы: $W1/2$
Для короткозамкнутого ротора ("беличья" клетка):

$$I2\text{ф} = (0,85 \div 0,9) \times I1\text{ф} \times \frac{m1 \times fw1 \times W1}{m2 \times fw2 \times W2}$$

но так как

$$fw2 = 1 \quad W2 = 0,5 \quad m2 = \frac{z2}{p}$$

то:

$$I2\text{ф} = (0,85 \div 0,9) \times I1\text{ф} \times \frac{m1 \times fw1 \times W1 \times p}{z2 \times 1 \times 0,5} = (1,7 \div 1,8) \times \frac{I1\text{ф} \times m1 \times W1 \times fw1 \times p}{z2}$$

или

$$I2\text{ф} = (1,7 \div 1,8) \times I1\text{ф} \times \frac{m1 \times W1 \times fw1 \times p}{z2}$$

Ток в стержне:

$$Is = \frac{I2}{p}$$

Ток в короткозамкнутом кольце:

$$I\text{к} = \frac{Is}{2 \times sin \times \frac{\pi \times p}{z2}} \;\text{ или приближенно }\; I\text{к} \approx 0,16 \times \frac{Is \times z2}{p}$$

где: p – число пар полюсов.

46. Пересчет асинхронных двигателей на другое напряжение.

При пересчете на новое напряжение необходимо сохранение магнитного потока или небольшое отклонение не более чем на ±5%. Для этого число витков на фазу берем прямо пропорционально изменению напряжения, а обмоточные данные ротора не изменяем, так как напряжение на кольцах ротора установится пропорционально отношению витков. При переходе на напряжение значительно выше 500 *в* следует несколько уменьшить мощность двигателя, так как ухудшится коэффициент заполнения паза из–за усиленной изоляции. Пусть:

$$E\text{стар} = 4{,}44 \times fw1 \times f1 \times \Phi \times W\text{стар} \times 10^{-8}\ \text{в}$$
$$E\text{нов} = 4{,}44 \times fw1 \times f1 \times \Phi \times W\text{нов} \times 10^{-8}\ \text{в}$$

Разделим одно выражение на другое:

$$\frac{E\text{нов}}{E\text{стар}} = \frac{4{,}44 \times fw1 \times f1 \times \Phi \times W\text{нов} \times 10^{-8}}{4{,}44 \times fw2 \times f1 \times \Phi \times W\text{стар} \times 10^{-8}} = \frac{W\text{нов}}{W\text{стар}}$$

или

$$\frac{E\text{нов}}{E\text{стар}} = \frac{W\text{нов}}{W\text{стар}}$$

но

$$E\text{нов} \approx U\text{нов} \quad \text{и} \quad E\text{стар} \approx U\text{стар}$$

тогда:

$$\frac{U\text{нов}}{U\text{стар}} = \frac{W\text{нов}}{W\text{стар}} \qquad \text{т. е. окончательно:} W\text{нов} = W\text{стар} \times \frac{U\text{нов}}{U\text{стар}}$$

откуда новое число эффективных проводов в пазу:

$$N\text{п. нов} = N\text{п. стар} \times \frac{U\text{нов}}{U\text{стар}}$$

При подборе нового эффективного числа проводов в пазу можно подбирать параллельные ветви и параллельные провода в зависимости от надобности и удобства выполнения обмотки. Эффективная площадь поперечного сечения проводника найдется:

$$s\text{м. нов} = s\text{м. стар} \times \frac{I\text{стар}}{I\text{нов}} \quad \text{или} \quad s\text{м. нов} = s\text{м. стар} \times \frac{N\text{п. стар}}{N\text{п. нов}}$$

Потребный ток определится:

$$I\text{нов} = I\text{стар} \times \frac{U\text{стар}}{U\text{нов}}$$

Пример 1. Асинхронный четырехполюсный двигатель напряжением 220/380 *в* при токе 19/11 *а*, с числом эффективных проводов в пазу *N*п = 24 и диаметром провода обмотки 1,81 *мм*. необходимо перемотать на 127/220 *в*. Находим:
1) новое эффективное число проводов в пазу:

$$N\text{п. нов} = N\text{п. стар} \times \frac{U\text{нов}}{U\text{стар}} = 24 \times \frac{220}{380} = 14$$

так как диаметр провода получится значительно больше диаметра 1,81 *мм*., то соединяем обмотку в 2 параллельные ветви (*а* = 2) и берем вместо 14, *N*п.нов = 28;

2) новое поперечное сечение проводника:

$$s\text{м. нов} = s\text{м. стар} \times \frac{N\text{п. стар}}{N\text{п. нов}} = 2{,}63 \times \frac{24}{28} = 2{,}25 \ \text{мм}^2$$

(диаметр 1,68 *мм*. ПБД), где: sм.стар = 0,785 × 1,81^2 = 2,63 *мм*^{2}.
Новое сечение sм.нов = 2,25 мм^2 относится к элементарному проводнику.

Пример 2. Асинхронный двигатель напряжения на 220 *в* с соединением обмотки в звезду при токе 25 *а*, числе эффективных проводов в пазу Nп = 30 и диаметром провода 1,62 *мм*., необходимо перемотать на 500 *в* с соединением в звезду:

$$U\text{стар} = 220\ \text{в} \quad s\text{м. стар} = 0{,}785 \times 1{,}62^2 = 2{,}1 \ \text{мм}^2 \quad N\text{п. стар} = 30$$

при Uнов = 500 *в*, чему равно sм.нов находим:
1. Новое эффективное число проводов в пазу:

$$N\text{п. нов} = N\text{п. стар} \times \frac{U\text{нов}}{U\text{стар}} = 30 \times \frac{500}{380} = 68$$

2. Новое поперечное сечение проводника:

$$s\text{м. нов} = s\text{м. стар} \times \frac{N\text{п. стар}}{N\text{п. нов}} = 2{,}1 \times \frac{30}{68} = 0{,}93 \ \text{мм}^2$$

диаметр 1,08 *мм*. ПБО.
3. Силу тока при 500 *в*:

$$I\text{нов} = I\text{стар} \times \frac{U\text{стар}}{U\text{нов}} = 25 \times \frac{220}{500} = 11\ \text{а}$$

47. Пересоединение обмотки.

В случае отсутствия дефектов в обмотке статора двигателя, особенно средней и большой мощности, ее перематывать нет надобности, а надо попытаться пересоединить обмотку на требуемое напряжение, т. е. изменить число параллельных ветвей или число параллельных проводов. Если обмотка с новым числом параллельных ветвей будет иметь разницу в числе эффективных проводников на 10÷15% по сравнению с необходимым, то требуется установить точно мощность двигателя, исходя из нормального перегрева. Пересоединение возможно с большего напряжения на меньшее, а с меньшего на большее удается лишь тогда, когда в обмотке имеются параллельные ветви, поэтому этот случай является редким. При последовательном соединении катушечных групп в фазе пересоединить обмотку на большее напряжение совершенно нельзя. При пересоединении двигателя на большее напряжение следует иметь в виду, что при напряжении 500 *в* и выше требуется усиление изоляции в пазу, что поведет к перемотке двигателя и уменьшению мощности.
Итак, пересоединения возможны при условии сохранения характеристик двигателя на следующие напряжения:

1) пропорциональное $\sqrt{3}$ (220 в Y пересоединяем на напряжение 127 *в* △ или 220 *в* △ на 380 *в* Y)

2) кратное 2, 3 и т. д., если числа параллельных ветвей позволят (U = 6000 *в* Y последовательное соединение и 3000 *в* Y соединение в 2 параллельные ветви);

3) пропорциональное приблизительно $\sqrt{3}$ и кратное параллельным ветвям.

Последний случай требует точного пересчета, так как свойства двигателя, безусловно ухудшатся, а следовательно, и несколько изменится мощность.

Пример 1. Трехфазный асинхронный двигатель 127 *в* △ имеет соединение катушечных групп в фазе в 2 параллельные ветви. Необходимо пересоединить на 500 *в* △. Для этого требуется переключить катушки на последовательное соединение, что соответствует напряжению:

$$U = 127 \times 2 \times \sqrt{3} = 440 \text{ в } Y$$

а необходимо 500 *в* Y. Следовательно, поток увеличится в отношении: 500/440 = 1,14, т. е. на 14%, и намагничивающий ток увеличится в $(1{,}14)^2 = 1{,}3$, т. е. на 30%, а в насыщенной машине еще больше (cos φ и к. п. д. понизятся). В отношении нагрева двигатель будет иметь некоторый тепловой баланс, так как, с одной стороны, нагрев активной стали увеличится за счет увеличения магнитной индукции, с другой – нагрев обмотки при нагрузке уменьшится за счет уменьшения плотности тока в $(1{,}14)^2 = 1{,}3$ раза, т. е. на 30%. В результате этого выделение тепла из пазовых частей уменьшится – и общий нагрев статора либо компенсируется, либо незначительно в ту или иную сторону изменится, что будет в пределах норм. Такое пересоединение осуществить возможно с сохранением мощности, если допустимые магнитные индукции не на пределе. При этом перегрузочная способность двигателя повысится.

Пример 2. Асинхронный трехфазный двигатель *U* = 500 *в* Y с последовательным соединением катушек в фазе необходимо пересоединить на 220 *в*. Пересоединяем катушки на 2 параллельные ветви, тогда число эффективных витков фазы уменьшится в 2 раза, а омическое сопротивление в $2^2 = 4$ раза, что соответствует напряжению 500/2 = 250 в. В этом случае магнитный поток понизится в 250/220 = 1,14 раза, нагрев активной стали и намагничивающий ток уменьшатся, а следовательно, улучшится cos φ и ухудшится к. п. д. за счет повышенных потерь в меди. При неизменной мощности, если позволит перегрузочная способность, плотность тока увеличится в 1,14 раза, а нагрев обмотки увеличится в $(1{,}14)^2 = 1{,}3$ раза, т. е. на 30%. Если даже по нагреву двигатель выдержит, то ввиду уменьшения перегрузочной способности двигатель не "потянет" на данную мощность, поэтому необходимо пересчитать на меньшую мощность: при *P* = 5,5 *квт*. получим:

$$P\text{нов} = \frac{P\text{стар}}{1{,}14^2} = \frac{5{,}5}{1{,}3} = 4{,}2 \text{ квт.}$$

т. е. мощность понизится на 30%.

48. Пересчет асинхронных двигателей на другое число оборотов.

Чтобы изменить число оборотов двигателя, необходимо изменить число полюсов в статоре, а следовательно, подобрать другой шаг обмотки по пазам и число пазов на полюс и фазу. При этом число проводов в пазу и площадь поперечного сечения провода, безусловно, будут другими. Магнитный поток при изменении числа оборотов асинхронного двигателя будет меняться прямо пропорционально числу оборотов, если необходимо неизменное напряжение на зажимах при *f* = *const*.
Пусть число оборотов, мощность, число полюсов, число проводов в пазу будут:

nстар, Pстар, Nп.стар, $2p$стар nнов, Pнов, Nп.нов, $2p$нов

тогда:

$$n\text{нов} = n\text{стар} \times \frac{N\text{п. стар}}{N\text{п. нов}}$$

Новое число оборотов обратно пропорционально эффективному числу проводов в пазу. Новое число полюсов определится:

$$2p\text{нов} = 2p\text{стар} \times \frac{n\text{стар}}{n\text{нов}}$$

или

$$2p\text{нов} = \frac{120 \times f}{n\text{нов}}$$

если подставим вместо:

$$p\text{стар} = \frac{60 \times f}{n\text{стар}}$$

где: f – частота тока, *гц*.
Мощность изменяется примерно пропорционально изменению числа оборотов.

Пусть:

$$P\text{стар}, n\text{стар}, cos\varphi\text{стар}, \eta\text{стар} \quad P\text{нов}, n\text{нов}, cos\varphi\text{нов}, \eta\text{нов}$$

тогда:

$$P\text{нов} = P\text{стар} \times \frac{n\text{нов} \times cos\varphi\text{нов} \times \eta\text{нов}}{n\text{стар} \times cos\varphi\text{стар} \times \eta\text{стар}}$$

Значения $cos\ \varphi$ и к. п. д. можно брать из табл. 25.
Если пренебречь $cos\ \varphi$ и η, то можно найти мощность по приближенной формуле:

$$P\text{нов} \approx P\text{стар} \times \frac{n\text{нов}}{n\text{стар}}$$

При переходе на большее число оборотов следует проверить окружную скорость. Так как при уменьшении числа полюсов двигателя необходимо увеличить во столько же раз магнитный поток для сохранения магнитной индукции в воздушном зазоре, то следует проверить индукцию в спинке статора, иначе двигатель будет чрезмерно греться. При пересчете на 3000 *об. мин.* необходимо значительно снизить индукцию в воздушном зазоре, иначе спинка статора будет сильно нагружена, поэтому повышение мощности будет относительно меньшее. При переходе с 1500 *об. мин.* на 3000 *об. мин.* в среднем мощность повышается в 1,5 раза. Можно легко подсчитать максимальную индукцию в воздушном зазоре по приближенной формуле для $f = 50$ *гц* и $m = 3$.

$$Bl = \frac{2{,}5 \times U\text{ф}1 \times p \times 10^6}{Di \times li \times z \times N\text{п}1}$$

где: 2,5 – коэффициент, учитывающий падение напряжения, и обмоточный коэффициент обмотки; p – число пар полюсов; $U\text{ф}1$ – фазовое напряжение, в;

при соединении звезда: $U\text{ф}1 = \frac{U\text{л}1}{\sqrt{3}}$ при соединении треугольник: $U\text{ф}1 = U\text{л}1$

$$li = \frac{l1 + l}{2}$$

li – идеальная длина машины, *см*.
$l1$ – длина с каналами, *см*.
l – длина без каналов.

$$l1 = l + bs \times ns$$

bs – ширина вентиляционного канала, *см*. (обычно $bs = 10$ *мм*.), ns– число каналов.

Точнее максимальную индукцию можно подсчитать:

$$Bl = \frac{\Phi}{sl}, \quad sl = ai \times \tau \times li$$

где: *sl* – сечение в воздушном зазоре, в *см*²; τ – полюсное деление, *см*.

$$\tau = \frac{\pi \times Di}{2p}$$

ai– коэффициент магнитного перекрытия (*ai* = 0,65 ÷ 0,7):

$$aiмин = \frac{2}{\pi} = 0{,}637$$

что соответствует синусоидальной форме поля; Ф – магнитный поток на одну фазу обмотки, *мкс*. *Bl* – максимальная индукция, *гс*. Так как $E1ф \approx U1ф$, если пренебречь падением напряжения в обмотке статора, то:

$$\Phi = \frac{Uф1 \times 10^8}{4{,}44 \times f \times fw1 \times W1}$$

При точном расчете необходимо учесть падение напряжения в обмотке статора:

$$E1ф = U1ф - \Delta U$$

где: $\Delta U = \varepsilon U$, а ε – относительное падение напряжения (см. табл. 24). Для вывода формулы берем *ai* = 0,7, *fw*1 = 0,96, *m*1 = 3, *f* = 50 *гц* и подставим вместо:

$$W1 = \frac{z1 \times Nп1}{2 \times m1}$$

тогда:

$$Bl = \frac{Uф1 \times 2m1 \times 10^8}{4{,}44 \times fw1 \times z1 \times Nп1 \times f1 \times ai \times \pi \times Di \times li} =$$

$$= \frac{Uф1 \times 2 \times 3 \times 10^8}{4{,}44 \times 0{,}96 \times z1 \times Nп1 \times 50 \times 0{,}7 \times 3{,}14 \times Di \times li} \approx \frac{2{,}5 \times Uф1 \times p \times 10^6}{Di \times li \times z1 \times Nп1}$$

Для однофазной обмотки *m*1 = 1 и *f* = 50 *гц* при *z*р = ⅔ × *z*1 и *z*п = ⅓ × *z*1 определяем по формуле:

$$Bl = \frac{1{,}4 \times U \times p \times 10^6}{Di \times li \times z1 \times Nп1}$$

где: *z*1 – число всех пазов статора; *z*р – число пазов рабочей обмотки; *z*п – число пазов пусковой обмотки; *N*п1 – число эффективных проводов в пазу рабочей обмотки.

Найдя индукцию в воздушном зазоре, проверяем индукцию в спинке статора и ротора по упрощенной формуле:

$$Ba1{,}2 \approx 0{,}6 \times \frac{Bl \times Di}{p \times ha1{,}2}$$

где: *ha*1,2 – высота спинки статора и ротора, *см*. (рис. 70).

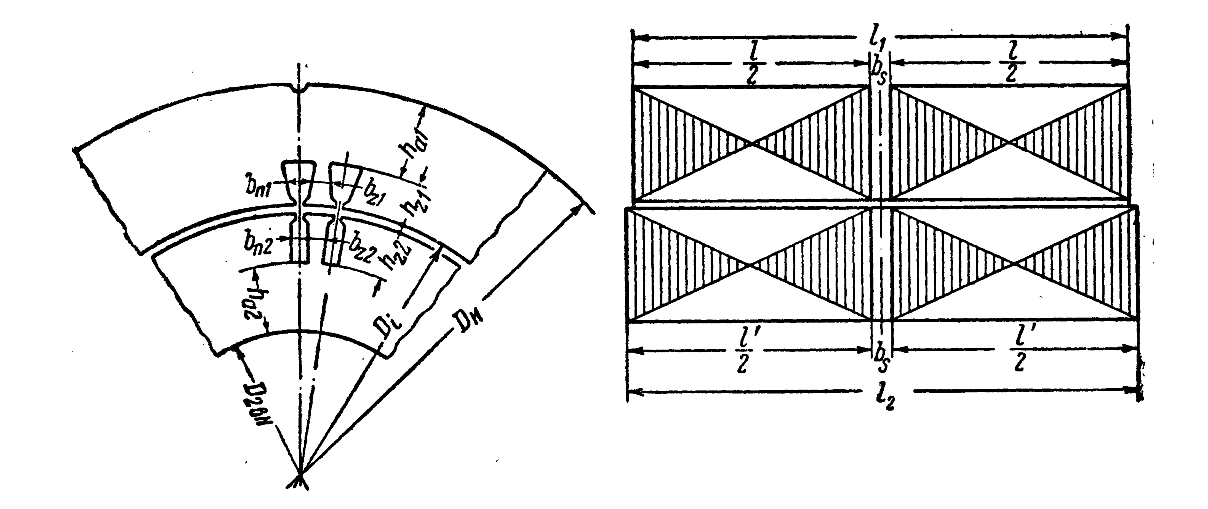


Рис. 70. Эскиз магнитной цепи асинхронного двигателя.

Точнее можно подсчитать по формуле:

$$Ba = \frac{\Phi}{2sa} \text{ где: } 2sa = 2 \times ha \times k\text{ст} \times l \quad \text{см}^2$$

kст – коэффициент заполнения активной стали, равный 0,9 – 0,97.
Выведем упрощенную формулу для подсчета индукции в спинках статора и ротора:

$$Ba = \frac{\Phi}{sa} = \frac{ai \times \tau \times li \times Bl}{2 \times ha \times l \times kcm} = \frac{ai \times \pi \times Di \times li \times Bl}{2p \times 2 \times ha \times l \times kcm} = \frac{0{,}7 \times 3{,}14 \times Di \times Bl \times li}{2 \times ha \times 2p \times 0{,}9} \approx$$

$$\approx 0{,}6 \times \frac{Bl \times Di}{p \times ha}$$

Затем проверяем максимальную магнитную индукцию в зубце статоре (в роторе можно не проверять):

$$Bz\text{макс} = \frac{Bl \times t1 \times li}{kcm \times bz\text{мин} \times l} \text{ где: } t1 \text{ шаг по зубцам } t1 = \frac{\pi \times Di}{z1} \text{ см.}$$

bzмин – минимальная толщина зубца, *см*. (по этой формуле подсчитывается и индукция в зубце ротора, тогда необходимо подставить $t2$ и $bz2$мин).
Допустимые значения максимальных магнитных индукция см. §43. Ток фазовый для двигателя найдется:

$$I\text{ф}1 = \frac{P \times 10^3}{3 \times I\text{л}1 \times \eta \times cos\varphi}$$

Затем проверяем плотность тока в статоре:

$$\Delta 1 = \frac{I1\text{ф}}{s\text{м}1\text{эфф}} \quad \text{а/мм}^2 \quad s\text{м}1\text{эфф} = a1 \times a \times s\text{м}1\text{эл} \quad \text{мм}^2$$

где: a – число параллельных ветвей. $a1$ – число параллельных проводов.
Находим линейную нагрузку:

$$AS = \frac{I\text{ф}1 \times N\text{п}1}{t1} \text{ а/см.}$$

Произведение $AS \times \Delta 1 = \Delta t°C$ – перегреву, где: $AS \times \Delta 1 \le 1000 \div 2200$.

Таблица. 25. Коэффициент полезного действия и cosφ асинхронных электродвигателей в зависимости от номинальной мощности и числа оборотов.

	Двигатель короткозамкнутый									
	η (к. п. д)					*cos* φ				
P, квт.	3000	1500	1000	750	600	3000	1500	1000	750	600
0,1	0,67	0,68	–	–	–	0,75	0,69	–	–	–
0,25	0,71	0,72	–	–	–	0,80	0,74	–	–	–
0,52	0,76	0,77	0,75	–	–	0,84	0,78	0,73	––	–
1,0	0,795	0,805	0,79	–	–	0,86	0,81	0,75	–	–
1,75	0,82	0,83	0,815	–	–	0,87	0,84	0,79	–	–
2,85	0,84	0,845	0,835	–	–	0,88	0,85	0,8	–	–
4,5	0,85	0,86	0,85	0,83	–	0,89	0,86	0,81	0,79	–
6,8	0,86	0,865	0,855	0,84	–	0,89	0,87	0,82	0,81	–
10	0,87	0,87	0,86	0,85	–	0,89	0,87	0,83	0,82	–
14,5	0,88	0,88	0,87	0,86	–	0,89	0,87	0,83	0,83	–
20,5	0,89	0,885	0,88	0,87	–	0,9	0,88	0,84	0,84	–
29	0,9	0,895	0,885	0,88	–	0,9	0,88	0,85	0,85	–
40	0,905	0,9	0,895	0,89	0,885	0,91	0,89	0,83	0,86	0,83
55	0,91	0,91	0,905	0,90	0,895	0,91	0,9	0,87	0,83	0,84
75	0,915	0,915	0,91	0,905	0,9	0,91	0,9	0,88	0,87	0,85
100	0,92	0,92	0,915	0,91	0,905	0,92	0,9	0,88	0,87	0,85

	Двигатель с контактными кольцами (с фазным ротором)									
	η (к. п. д.)					*cos* φ				
P, квт.	3000	1500	1000	750	600	3000	1500	1000	750	600
1,75	–	–	0,79	–	–	–	–	0,74	–	–
2,85	–	0,83	0,81	–	–	–	0,82	0,77	–	–
4,5	–	0,845	0,83	0,88	–	–	0,84	0,79	0,77	–
6,8	–	0,855	0,855	0,84	–	–	0,85	0,81	0,79	–
10	–	0,87	0,86	0,85	–	–	0,86	0,83	0,81	–
14,5	0,88	0,88	0,87	0,86	–	0.89	0,87	0,84	0,83	–
20,5	0,89	0, 885	0,88	0,87	–	0,90	0,88	0.85	5,84	–
29	0,9	0,895	0,885	0,88	–	0,90	0,88	0,86	0,85	–
40	0,905	0,9	0,895	0,89	0,885	0,91	0,89	0,87	0,86	0,83
55	0,91	0,91	0,905	0,9	0,895	0,91	0,9	0,88	0,85	0,84
75	0,915	0,915	0,91	0,905	0,9	0,92	0,9	0,88	0,87	0,85
100	0,92	0,92	0,215	0,91	0,905	0,92	0,9	0,88	0,87	0,85
132	0,925	0,925	0,92	0,915	0,915	0,92	0,91	0,89	0,88	0,86
175	0,93	0,93	0,925	0,92	0,92	0,92	0,91	0,89	0.88	0,86
230	0,935	0,935	0,93	0,925	0,925	0,93	0,91	0,89	0,88	0,87
300	0,935	0,935	0,93	0,93	0,93	0,93	0,91	0,89	0,88	0,87

Примечания: 1. Асинхронные двигатели, приведенные в таблице по своей конструкций не предназначены для регулировки числа оборотов.
2. Двигатели, помещенные в таблице выше ступенчатой линии, исполняются без приспособления для подъема щеток и замыкания обмоток ротора на короткое.
3. Двигатели, помещенные ниже ступенчатой линии, исполняются с приспособлением для подъема щеток и для замыкания обмоток ротора на короткое.
4. При исполнениях электродвигателей, расположенных в таблице ниже ступенчатой линий, по особому заказу без приспособления для подъема щеток и замыкания обмоток ротора на короткое указанные в таблице к. п. д. уменьшаются:
для электродвигателей мощностью от 1,75 до 20,5 *квт.* (включительно) на 1,5%
для электродвигателей мощностью от 20,5 до 100 *квт.* (включительно) на 1%
для электродвигателей мощностью от 132 до 300 *квт.* (включительно) на 0,5%

Пример 1. Асинхронный трехфазный к. з. двигатель завода им. Лепсе типа ТА – 41/8, 3,7 *квт.*, 750 *об. мин.* (синхронных), 500 Y *в*, 7,2 *а* требуется перемотать на 1000 *об. мин.* (синхронных).

Данные:

$$D\text{н} = 295\ \text{мм.}, Di = 190\ \text{мм.}, t1 = t = 134\ \text{мм.}, \qquad z1 = 72, \qquad N\text{п} = 28$$

∅ 1,5 ПЭБО в 1 параллельный провод;

$$hz1 = 21\ \text{мм.}, b\text{п}1 = 6{,}2\ \text{мм.}, \qquad a = 1\ (\text{последовательное соединение})$$

1. Задаемся η и cos φ по табл. 25.

$$\cos\varphi = 0{,}72 \text{ и } \eta = 0{,}82 \text{ при } n1 = 750\ \text{об. мин.}$$

Для $n1$ = 1000 об/мин предварительно определяем:

$$P\text{нов} \approx 3{,}7 \times \frac{1000}{750} = 5\ \text{квт. и уточняем} \cos\varphi \text{ и } \eta, \cos\varphi = 0{,}78 \text{ и } \eta = 0{,}83$$

2. Находим окончательно мощность при 1000 *об. мин.*:

$$P\text{нов} = P\text{стар} \times \frac{n\text{нов} \times cos\varphi\text{нов} \times \eta\text{нов}}{n\text{стар} \times cos\varphi\text{стар} \times \eta\text{стар}} = \frac{1000 \times 0{,}78 \times 0{,}83}{750 \times 0{,}72 \times 0{,}82} = 5{,}5\ \text{квт.}$$

3. Ток фазовый при 1000 *об. мин.*:

$$I\text{л}1 = \frac{P\text{нов} \times 10^3}{\sqrt{3} \times U\text{ф}1 \times \eta\text{нов} \times cos\varphi\text{нов}} = \frac{5{,}5 \times 10^3}{1{,}73 \times 500 \times 0{,}83 \times 0{,}78} = 9{,}8\ a$$

$$\text{для } Y\ I\text{ф}1 = I\text{л}1 = 9{,}8\ a$$

4. Число эффективных проводов в пазу статора:

$$N\text{п. нов} = N\text{п. стар} \times \frac{n\text{стар}}{n\text{нов}} = 28 \times \frac{750}{1000} \approx 21$$

Округляем до Nп = 22.
5. Эффективная площадь поперечного сечения.

$$s\text{м. нов} = s\text{м. стар} \times \frac{N\text{п. стар}}{N\text{п. нов}} = 0{,}785 \times 1{,}5^2 \times \frac{28}{22} = 2{,}3\ \ \text{мм}^2$$

∅ 1,68 ПЭБО (2,23 $мм^2$).
6. Плотность тока.

$$\varDelta 1 = \frac{U\text{ф}1}{s\text{м. нов}} = \frac{9{,}8}{2{,}23} = 4{,}4\ \ \text{а/мм}^2$$

7. Линейная нагрузка.

$$AS = \frac{I\text{ф}1 \times N\text{п}1}{t1} = \frac{9{,}8 \times 22}{0{,}83} = 260\ \ \text{а/см.}\ \ \text{где } t1 = \frac{3{,}14 \times 19}{72} = 0{,}83\ \ \text{см.}$$

8. Перегрев Δt°C = AS × Δ1 = 260 × 4,4 = 1140.

9. Максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре.

$$Bl = \frac{2{,}5 \times U\text{ф}1 \times p \times 10^6}{Di \times li \times z1 \times N\text{п}1} = \frac{2{,}5 \times 289 \times 3 \times 10^6}{19 \times 13{,}4 \times 72 \times 22} = 5400 \text{ гс}$$

10. Магнитная индукция в спинке статора.

$$Ba1 \approx 0{,}6 \times \frac{Bl \times Di}{p \times ha1} = 0{,}6 \times \frac{5400 \times 19}{3 \times 3{,}15} = 6600 \text{ гс}$$

$$ha1 = \frac{D\text{н} - Di}{2} - hz1 = \frac{29{,}5 - 19}{2} - 2{,}1 = 5{,}25 - 2{,}1 = 3{,}15 \text{ см.}$$

11. Магнитная индукция в зубце статора.

$$Bz1\text{макс} = \frac{Bl \times t1}{kcm \times bz1\text{мин}} = \frac{5400 \times 0{,}83}{0{,}95 \times 0{,}3} = 15800 \text{ гс}$$

$$bz1\text{мин} = t'1 - b\text{п}1 = 0{,}92 - 0{,}62 = 0{,}3$$

где:

$$t'1 = \frac{\pi \times (Di + hz1)}{z} = \frac{3{,}14 \times (19 + 2{,}1)}{72} = 0{,}92 \text{ см.}$$

12. Окружная скорость.

$$v = \frac{\pi \times Di \times n}{60 \times 100} = \frac{3{,}14 \times 19 \times 1000}{60 \times 100} = 9{,}9 \text{ м/сек.}$$

что вполне допустимо.

При переходе на повышенную скорость вращения длина вылета лобовых частей обмотки повышается из–за увеличения шага обмотки по пазам. Весьма значительное увеличение длины лобовых частей обмотки наблюдается при переходе на 3000 *об. мин.* Поэтому обычно для последних берут укорочение шага обмотки по пазам значительно больше, чем 0,8 yп, т. е. примерно β =0,67, если не позволяет глубина подшипникового щита. Например, для z = 24 при 2p = 2 нормальный шаг обмотки по пазам:

$$y\text{п} = \frac{24}{2} = 12 \text{ но берут: } y'\text{п} = 8\ (1 - 9)\text{, откуда: } \beta = \frac{8}{12} = 0{,}67$$

При пересчете на пониженное число оборотов следует мощность занижать больше, чем требует пропорциональность между числом оборотов и мощностью, вследствие ухудшения вентиляции. Всегда следует иметь в виду изменение условий охлаждения машины при изменении числа оборотов, так как количество охлаждающего воздуха, прогоняемого вентилятором, пропорционально числу оборотов двигателя.

49. Пересчет асинхронных двигателей с трехфазной системы на однофазную.

При изготовлении как трехфазного, так и однофазного двигателя обычно используют один и тот же штамп, т. е. берут такой же статор (особенно при пересчетах), только заполняют обмоткой однофазного двигателя ⅔ пазов статора. Заполнение всех пазов невыгодно, так как значительно увеличивается расход меди (примерно на 35%), а э. д. с. возрастает лишь на 13,5%, к тому же ⅓ не заполненных рабочей обмоткой пазов необходима для пусковой обмотки.

При таком устройстве статорной системы однофазного двигателя и одинаковых геометрических размерах мощность данного двигателя составляет примерно 70% мощности трехфазного, т. е.:

$$P_I \approx 0{,}7 \times P_{III}$$

Кроме того, для повышения использования активного материала допускают магнитную индукцию в воздушном зазоре однофазного двигателя средней мощности примерно на 10–15% больше, чем для трехфазного:

$$Bl_I = 1{,}1 \div 1{,}15 \times Bl_{III}$$

Пусковая обмотка обычно мотается из проводов вдвое меньшей площадью поперечного сечения и вдвое большим количеством проводов в пазу по сравнению с рабочей обмоткой, т. е.

$$N\text{п. п} = 2 \times N\text{п. р} \quad \text{и} \quad s\text{м. п} = 0{,}5 \times s\text{м. р}$$

При пересчете с трехфазной системы на однофазную необходимо пользоваться следующими соотношениями чисел витков:

$$W_I = 1{,}73 \div 2 \times W_{III} \;\; \text{и} \;\; N\text{п}_I = 0{,}87 \div 1 \times N\text{п}_{III} \quad \text{при: } U\text{л}_I = U\text{л}_{III}Y$$

$$W_I = 1 \div 1{,}15 \times W_{III} \;\; N\text{п}_I = 0{,}5 \div 0{,}57 \times N\text{п}_{III} \quad \text{при: } U\text{л}_I = U\text{л}_{III}\Delta$$

где: W_{I} – число эффективных витков рабочей обмотки однофазной системы;
$N\text{п}_{\text{I}}$– число эффективных проводов рабочей обмотки однофазной системы;
W_{III} – число эффективных витков обмотки на фазу трехфазной системы;
$N\text{п}_{\text{III}}$ – число эффективных или расчетных проводов в пазу трехфазной системы.

Меньшие пределы коэффициентов (1,73; 0,87; 1 и 0,5) относятся к машинам средней мощности, а большие пределы (2; 1; 1,15 и 0,57) – к машинам малой мощности.
Коэффициент фазной зоны однофазной обмотки (m = 1) определится: для шестидесятиградусной зоны:

$$fa = \frac{sin\frac{\pi}{2m}}{q \times sin\frac{\pi}{2m \times q}} = \frac{sin\frac{180°}{2 \times 1}}{q \times sin\frac{180°}{2 \times 1 \times q}} = \frac{sin90°}{q \times sin\frac{90°}{q}} = \frac{1}{q \times sin\frac{90°}{q}}$$

или

$$fa = \frac{1}{q \times sin\frac{\pi}{2q}} \approx \frac{1}{q \times \frac{\pi}{2q}} = \frac{2}{\pi} = 0{,}637$$

т. е. чтобы получить от однофазной машины такое же напряжение как при $fw1 = 1$, надо иметь на 57% больше меди:

$$\frac{1}{0{,}637} = 1{,}57$$

для стодвадцатиградусной зоны:

$$fa = \frac{sin\frac{2}{3} \times \frac{\pi}{2m}}{q \times sin\frac{\pi \times 2}{3 \times q \times m}} = \frac{sin\frac{2}{3} \times \frac{180°}{2 \times 1}}{q \times sin\frac{180° \times 2}{3 \times q \times 1}} = \frac{sin60°}{q \times sin\frac{60°}{q}} = \frac{0{,}866}{q \times sin\frac{60°}{q}}$$

Возьмем отношение:

$$\frac{fa120°}{fa60°} = \frac{\dfrac{0,866}{q \times \sin\left(\dfrac{60°}{q}\right)}}{\dfrac{1}{q \times \sin\left(\dfrac{90°}{q}\right)}} = \frac{0,866 \times q \times \sin\left(\dfrac{90°}{q}\right)}{q \times \sin\dfrac{60°}{q}} = 0,866 \times \frac{\sin\left(\dfrac{90°}{q}\right)}{\sin\left(\dfrac{60°}{q}\right)}$$

очевидно, это отношение будет больше единицы при $q > 1$.
Пусть $q = 4$, тогда:

$$\frac{fa120°}{fa60°} = 0,866 \times \frac{\sin\left(\dfrac{90°}{q}\right)}{\sin\left(\dfrac{60°}{q}\right)} = 0,866 \times \frac{0,383}{0,259} = 1,28$$

т. е. примерно больше на 28%.
Поэтому выгодно пользоваться стодвадцатиградусной зоной в однофазной системе. Согласно теории однофазного асинхронного двигателя, коэффициент скольжения увеличивается почти вдвое при переходе с трехфазной системы на однофазную, т. е.

$$s_I\% \approx 2 \times s_{III}\%$$

Если пересчет происходит с однофазной системы на трехфазную, то следует проверить конец вала на новую повышенную мощность при тех же числах оборотов:

$$d\text{в} \approx 19,5 \div 25 \times \sqrt{\frac{Pa}{n1}}$$

где dв – диаметр конца вала, см; Pa – полезная мощность, *квт.*; $n1$– синхронное число оборотов, *об. мин.*

50. Пересчет асинхронных двигателей на другую частоту.

Для того чтобы при изменении частоты в сети и сохранении обмоточных данных у асинхронного двигателя не изменились его свойства (*cos* φ, нагревание, перегрузочная способность), следует одновременно с изменением частоты подвести к нему другое напряжение при неизменном моменте вращения так, чтобы поток остался постоянным. Например, при увеличении частоты необходимо увеличить и подводимое к двигателю напряжение, так как $\Phi = U/f$. На практике может быть наиболее распространенный случай меняющейся частоты в сети при Mвр = *const* и (U = *const*). Изменение частоты при постоянном напряжении и обмоточных данных влечет за собой изменение величины магнитного потока двигателя ($U \approx E = k \times f \times \Phi$). При увеличении частоты тока f поток Ф будет уменьшаться. Последний уменьшит реактивную составляющую тока либо пропорционально, если машина не насыщена, либо даже больше, если машина насыщена. При постоянном моменте активная составляющая тока увеличится, так как Mвр = $k \times \Phi \times I_2$, в результате cos φ улучшится. Теоретически ток холостого хода может измениться в ту или другую сторону, но практически будет несколько уменьшаться. Далее, уменьшение потока уменьшит потери в активной стали, несмотря на увеличение частоты, так как потери в данной стали пропорциональны индукции в квадрате, а частоте – только в степени 1,5 ÷ 1,6. В насыщенной машине снизятся и потери в меди из–за резкого уменьшения реактивной составляющей тока. Механические потери можно считать приблизительно одинаковыми в случае небольших изменений частоты, потому что тогда скольжение мало меняется. Итак, практически скольжение незначительно уменьшится при увеличении f.

Перегрузочная способность в этом случае постоянна (Mмакс = const), а мощность пропорциональна частоте, так как:

$$\frac{P1}{P2} = \frac{M\omega 1}{M\omega 2} = \frac{f1}{f2}$$

В отношении допускаемой нагрузки следует иметь в виду изменение охлаждения машины при изменении числа оборотов. В случае уменьшения частоты все наши рассуждения меняются в противоположную сторону.

При переходе на другую частоту с целью сохранения свойств двигателя необходимо магнитный поток оставить прежним (Ф = const) при U = const и, следовательно, изменить обмоточные данные двигателя, так как:

$$\Phi = \frac{U}{f \times W}$$

При пересчете на повышенную частоту при $n = const$ увеличится число полюсов машины, что уменьшает шаг обмотки по пазам и длину вылета лобовой части, отражаясь в выгодную сторону на размерах машины. Чрезмерное повышение частоты повышает потери в активной стали и потери в меди обмотки из–за явления вытеснения тока и в результате понижается к. п. д. (η).

Пусть число оборотов $n = const$, а мощность, число полюсов, частота тока, число эффективных проводов в пазу будут:

старые: $P\text{стар}, N\text{п}.\,стар, 2p\text{стар}, f\text{стар}$ новые: $P\text{нов}, N\text{п. нов}, 2p\text{нов}, f\text{нов}$

1) тогда новое число полюсов:

$$2p\text{нов} = 2p\text{стар} \times \frac{f\text{нов}}{f\text{стар}}$$

2) шаг обмотки по пазам:

$$y\text{п. нов} = \frac{z}{2p\text{нов}}$$

3) число пазов на полюс–фазу:

$$q\text{нов} = q\text{ст} \times \frac{2p\text{ст}}{2p\text{нов}}$$

и число катушечных групп:

$$n\text{к. нов} = n\text{к. ст} \times \frac{2p\text{нов}}{2p\text{ст}}$$

4) эффективное число проводов в пазу:

$$N\text{п. нов} = N\text{п. стар} \times \frac{f\text{нов}}{f\text{стар}}$$

5) мощность изменится прямо пропорционально изменению частоты:

$$P\text{нов} = P\text{стар} \times \frac{f\text{нов}}{f\text{стар}}$$

Если требуется значительно повысить частоту, а марка активной стали является не первосортной, то необходимо занизить повышение мощности, примерно на 15 ÷ 35% до 500 *гц*. При пересчете на повышенную частоту следует учесть улучшение качества изоляции и проверить из–за повышения мощности при $n = const$ конец вала.

Пример 1. Асинхронный трехфазный к. з. двигатель завода "Электросила" типа АД–71/2 28 *квт*., 2950 *об. мин.*, 500 *в* Y, 41 *а*, 50 *гц* требуется пересчитать на 150 *гц* при неизменном числе оборотов, если известно, что: z = 36, Nп = 13 (Nп1эл = 39), диаметр 1,56 ПЭБО в 3 параллельных провода, a = 1 (последовательное соединение) и dв = 55 *мм*.

Находим:

1) число полюсов:

$$2p\text{нов} = 2p\text{стар} \times \frac{f\text{нов}}{f\text{стар}} = 2 \times \frac{150}{50} = 6$$

2) шаг обмотки по пазам:

$$y\text{п. нов} = \frac{z}{2p\text{нов}} = \frac{36}{3} = 6\ (1-6)\ \text{ т.е.} \beta = 0{,}833$$

3) число пазов на полюс–фазу:

$$q\text{нов} = q\text{ст} \times \frac{2p\text{ст}}{2p\text{нов}} = 6 \times \frac{2}{6} = 2$$

и число катушечных групп:

$$n\text{к. нов} = n\text{к. ст} \times \frac{2p\text{нов}}{2p\text{ст}} = 6 \times \frac{6}{2} = 18$$

4) эффективное число проводов в пазу:

$$N\text{п. нов} = N\text{п. стар} \times \frac{f\text{нов}}{f\text{стар}} = \frac{13 \times 50}{150} = 4{,}35$$

округляем до 5 с учетом уменьшения индукции на 15%.

5) число элементарных проводов:

$$N\text{п. эл} = N\text{п. нов} \times a\text{нов} \times a = 5 \times 4 \times 2 = 40$$

(берем aнов = 4 параллельным проводам и a = 2 параллельным ветвям).

6) эффективная площадь поперечного сечения:

$$s\text{м. нов. эфф} = s\text{м. ст. эфф} \times \frac{N\text{п. стар}}{N\text{п. нов}} = 0{,}785 \times 1{,}56^2 \times 3 \times \frac{13}{5} = 15\ \ \text{мм}^2$$

7) элементарная площадь поперечного сечения:

$$s\text{м. эл. нов} = \frac{s\text{м. нов. эфф}}{a\text{нов} \times a} = \frac{15}{4 \times 2} = 1{,}88\ \text{ мм}^2$$

диаметр 1,5 ПЭБО (1,77 *мм*^{2}).

8) мощность:

$$P\text{нов} = P\text{стар} \times \frac{f\text{нов}}{1{,}15 \times f\text{стар}} = 28 \times \frac{150}{1{,}15 \times 50} \approx 70\ \text{квт.}$$

9) сила тока:

$$I\text{нов} \approx I\text{стар} \times \frac{P\text{нов}}{P\text{стар}} = 41 \times \frac{70}{28} \approx 102\ a$$

10) плотность тока:

$$\Delta 1 = \frac{I\text{нов}}{s\text{м. эфф. нов}} = \frac{102}{8 \times 1{,}77} = 7{,}2\ \text{ а/мм}^2$$

11) проверяем конец диаметра вала:

$$d\text{в} = 20 \times \sqrt[3]{\frac{P}{n}} = 20 \times \sqrt[3]{\frac{70}{3000}} = 20 \times 0{,}285 = 5{,}7\ \text{см.}$$

что недопустимо, так как заданный диаметр вала dв = 55 *мм*.

Так как потребный диаметр меньше данного, то следует уменьшить мощность так, чтобы диаметры оказались равными, т. е. dпотр = dданн, тогда окончательно:

$$P = \left(\frac{d\text{в}}{20}\right)^3 \times n = \left(\frac{5{,}5}{20}\right)^3 \times 3000 \approx 60 \text{ квт}$$

51. Восстановление паспорта асинхронных двигателей не имеющих обмоток и паспортных табличек.

В случае, если двигатель не имеет ни паспорта, ни обмоток как в статоре, так и в роторе, то необходимо делать полный расчет. Иногда удается опытным путем по внешнему виду двигателя определить не только завод–изготовитель, но даже тип машины. Тогда следует обратиться к справочным материалам для данного типа машины и завода–изготовителя. Последние дают возможность найти параметры обмотки и установить паспорт, т. е. подсчитать мощность по заданным числу оборотов, напряжению, числу фаз, частоте тока и т. д. Если в справочных материалах имеется искомый двигатель, то обмоточные данные и паспорт легко найти по внутреннему диаметру статора Di, длинам статора $l1$ и l и числу пазов z, откуда:

$$li = \frac{l1 + l}{2}$$

Разберем наихудший случай, когда нельзя установить завода–изготовителя двигателя, тогда первой ориентировкой для расчета обмоточных данных и восстановления паспорта является исполнение двигателя (открытое, закрытое, обдуваемое, герметически закрытое и т. д.). Вторым руководством служат присутствие или отсутствие вентилятора и третьим – учет "старения" активной стали статора и ротора, изоляция листов, сорт и толщина динамной стали и т. д.

В зависимости от вышеуказанных факторов можно подобрать те или иные электромагнитные нагрузки (плотность тока в обмотке статора и ротора и максимальную магнитную индукцию в воздушном зазоре). Предварительно необходимо сделать следующие замеры статора и ротора:

I. Статор		II. Ротор (короткозамкнутый или с контактными кольцам)	
1.	$D1$н в *мм*.	1.	$D2$н в *мм*.
2.	Di в *мм*.	2.	Dвн в *мм*.
3.	$l1 = l + ns \times bs$ в *мм*.	3.	$ha2$ в *мм*.
4.	$ha1$ в *мм*.	4.	hп2 в *мм*.
5.	hп1 в *мм*.	5.	bп2ср/bпрор2 в *мм*.
6.	$bz1$ в мм.	6.	$bz2$мин в *мм*.
7.	bzмин/bzмакс в *мм*.	7.	$z2$
8.	bп1ср/bпрор.1 в *мм*.	8.	∅ стержня и сечение короткозамыкающих колец
9.	Δст.1 в *мм*.	9.	Δст.2 в *мм*.
10.	$z1$	10.	диаметр конца вала dв в мм.

Дано: 1. Линейное напряжение статора Uл1, число оборотов в минуту (синхронное) $n1$ *об. мин.*, частота тока f *гц*, число фаз статора $m1$.

2. Сопряжение фаз:

$$\triangle/Y \ \left(U\text{л}_Y = \sqrt{3} \times U\text{л}_\triangle\right)$$

3. Число пар полюсов:

$$p = \frac{60 \times f}{n1} \quad 2p = 2 \times \frac{60 \times f}{n1}$$

4. Число пазов статора на полюс и фазу:

$$q1 = \frac{z1}{2p \times m1}$$

5. Число пазов ротора на полюс и фазу:

$$q2 = \frac{z2}{2p \times m2} \quad \text{(для ротора обычно } m2 = m1\text{)}$$

6. Зубцовое деление статора и ротора по коронкам зубцов:

$$t1 = \frac{\pi \times Di}{z1} \quad t2 = \frac{\pi \times D2\text{н}}{z2} \quad \text{см.}$$

7. Полюсное деление:

$$\tau = \frac{\pi \times Di}{2p} \quad \text{см. и окружная скорость: } v = 2 \times \tau \times f \quad \text{см/сек.}$$

и при f = 50 *гц*, v = 100 × τ *см/сек*. или как обычно принято при всех механических расчетах v = τ *м/сек*.

8. Сечение расточки статора в воздушном зазоре:

$$sl = ai \times \tau \times li \quad \text{см}^2 \text{ (обычно } ai = 0{,}65 \div 0{,}7\text{)} \quad li = \frac{l1 + l}{2} \quad \text{см.}$$

9. Удвоенные сечения спинок статора и ротора:

$$2 \times sa1 = 2 \times k\text{ст} \times l \times ha1 \quad \text{см.} \quad 2 \times sa2 = 2 \times k\text{ст} \times l \times ha2 \quad \text{см.}$$

10. Шаги обмоток по пазам статора и ротора:

$$y\text{п}1 = \frac{z1}{2p} \quad \text{и} \quad y\text{п}2 = \frac{z2}{2p} \quad \beta 1{,}2 \approx 0{,}8 \times y\text{п}1{,}2 \quad \text{и} \quad y\text{п}'1{,}2 \approx 0{,}8 \times y\text{п}1{,}2 \quad \text{истинное } \beta 1{,}2 = \frac{y'\text{п}1{,}2}{y\text{п}1{,}2}$$

11. Число катушек статора и ротора:

$$n\text{к}1 = p \times m1 \quad \text{и} \quad n\text{к}2 = p \times m2 \text{ – для простой катушечной обмотки.}$$
$$n\text{к}1 = 2p \times m1 \quad \text{и} \quad n\text{к}2 = 2p \times m2 \text{ – для двухслойной катушечной обмотки.}$$

12. Обмоточный коэффициент обмотки статора и ротора:

$$fw1 = fa1 \times f\text{к}1 = \frac{sin\frac{\pi}{2 \times m1}}{q1 \times sin\frac{\pi}{2 \times m1 \times q1}} \times \sin\,(90° \times \beta 1)$$

и

$$fw2 = \frac{sin\frac{\pi}{2 \times m2}}{q2 \times sin\frac{\pi}{2 \times m2 \times q2}} \times \sin\,(90° \times \beta 2)$$

13. Электромагнитные нагрузки: (Δ1 Δ2 и Bl). Выбираем в табл. 7, 22, 23.

14. Магнитный поток двигателя при холостом ходе:

$$\text{Фо} = Bl \times sl \quad \text{мкс}$$

15. Число эффективных витков на фазу статора:

$$W1 = \frac{U\text{ф}1 \times 10^8}{4{,}44 \times f \times fw1 \times \text{Фо}}$$

при: Uф = 220 *в*, f = 50 *гц* и fw1 = 0,96:

$$W1 = \frac{10^8}{\text{Фо}}$$

16. Число эффективных проводов в пазу статора:

$$N\text{п}1 = \frac{2 \times m1 \times W1}{z1}$$

17. Число элементарных проводов в пазу статора:

$$N\text{эл.}1 = N\text{п}1 \times a1 \times a$$

где: a – число параллельных ветвей; $a1$ – число параллельных проводов в пазу.
18. Число эффективных витков в фазе ротора для $m1$ = $m2$ и одинакового соединения фаз статора и ротора:

$$W2 = W1 \times \frac{fw2}{fw1} \times \frac{U2\text{л}}{U1\text{л}}$$

для однофазного двигателя ($m1$ = 1):

$$W2 = W1 \times \frac{fw2}{fw1} \times \frac{U2\text{л}}{2 \times U1\text{л}}$$

где: $U2$л – напряжение на разомкнутых кольцах ротора (обычно до 300 *в* для малых и средних двигателей и выше 300 *в* для больших).
19. Число эффективных проводов в пазу ротора:

$$N\text{п}2 = \frac{2 \times m2 \times W2}{z2} \quad \text{а} \quad N\text{эл.}2 = N\text{п}2 \times a2 \times a'$$

20. Задаемся диаметром провода $d1$, определяем поперечное сечение:

$$s\text{м}1 = 0{,}785 \times d_1^2$$

и проверяем по коэффициенту заполнения паза kп1.
21. Коэффициент заполнения паза статора:

$$k\text{п}1 = \frac{s\text{м}1\text{из} \times N\text{эл.}1}{b\text{п}1 \times h\text{п}1} \leq 0{,}38 \div 0{,}45 \text{ до } 500 \text{ в}$$

22. Фазовый ток статора:

$$I\text{ф}1 = a1 \times a \times s\text{м}1 \times \Delta 1a$$

23. Линейная нагрузка статора:

$$AS = \frac{I\text{ф}1 \times N\text{п}1}{t1} \quad \text{а/см.}$$

24. Фактор пропорционального перегрева:

$$\Delta t°C = AS \times \Delta 1 \leq 1000 \div 2200 \text{ (см. § 43).}$$

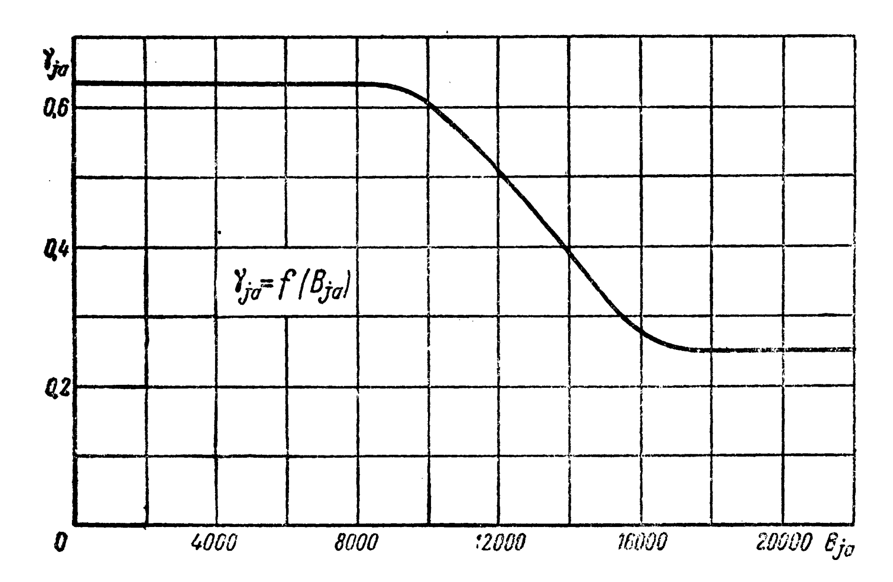


Рис. 71. График коэффициента неравномерного распределения магнитных силовых линий вдоль спинки магнитопровода.

25. Фазовый ток ротора:
для многофазного двигателя:

$$I\text{ф}2 = 0{,}85 \div 0{,}9 \times I\text{ф}1 \times \frac{m1 \times W1 \times fw1}{m2 \times W2 \times fw2}$$

для однофазного двигателя ($m1$ = 1):

$$I\text{ф}2 = 0{,}85 \div 0{,}9 \times I\text{ф}1 \times \frac{W1 \times fw1}{2 \times W2 \times fw2}$$

26. Элементарное сечение обмотки ротора:

$$s\text{м}2 = \frac{I\text{ф}2}{a2 \times a' \times \Delta 2} \text{ мм}^2$$

27. Коэффициент заполнения паза ротора:

$$k\text{п}2 = \frac{s\text{м}1\text{из}}{b\text{п}2 \times h\text{п}2} \leq 0{,}38 \div 0{,}45 \text{ до 500 в}$$

28. Максимальные индукции в зубцах статора и ротора:

$$Bz1\text{макс} = \frac{t1 \times Bl \times li}{k\text{ст} \times bz1\text{мин} \times l} \text{ гс} \quad \text{и} \quad Bz2\text{макс} = \frac{t2 \times Bl \times li}{k\text{ст} \times bz2\text{мин} \times l} \text{ гс}$$

29. Минимальная и средняя индукции в зубцах статора:

$$Bz1\text{мин} = \frac{t1 \times Bl \times li}{k\text{ст} \times bz1\text{макс} \times l} \text{ гс} \quad \text{и} \quad Bz1\text{ср} = \frac{t1 \times Bl \times li}{k\text{ст} \times bz1\text{ср} \times l} \text{ гс}$$

30. Индукции в спинках статора и ротора:

$$Ba1 = \frac{\Phi}{2sa1} \text{ гс} \quad Ba2 = \frac{\Phi}{2sa2} \text{ гс}$$

31. Коэффициент воздушного зазора:

$$kс = kс1 \times kс2 = \left(\frac{t1 + 10 \times \delta}{bz1 + 10 \times \delta}\right) \times \left(\frac{t2 + 10 \times \delta}{bz2 + 10 \times \delta}\right)$$

где: $bz1$ и $bz2$ – ширина коронок зубцов статора и ротора,

$$bz1 = t1 - bпрор1 \quad и \quad bz2 = t2 - bпрор2$$

32. Суммарные ампервитки двигателя или ампервитки холостого хода на полюс:

$$\Sigma AW = AWо = AWi + AWстат + AWрот$$

где ампервитки в воздушном зазоре:

где ампервитки в воздушном зазоре: $AWi = 0{,}8 \times kс \times \delta \times Bi$
ампервитки статора: $AWстат = AWz1 + AWa1$

$$AWz1 = hп1 \times \left(\frac{awzмакс + awzмин + 4awzср}{6}\right)$$

по табл. 10 находим $awz = f \times (Bz)$:

$$AWa1 = awa1 \times La1 \times \gamma a1$$

где: $\gamma a1$ – коэффициент, характеризующий неравномерное распределение силовых линий вдоль спинки; $\gamma a1$ = 0,3÷0,637 в зависимости от индукции в спинке (чем выше индукция, тем меньше $\gamma a1$); $\gamma a1 = f \times (Ba)$ по рис. 71; $La1$ – средняя длина силовых линий в спинке статора, *см.*;

$$La1 = \frac{\pi \times (Dн - ha1)}{4p}$$

Ампервитки в роторе составляют примерно 90% ампервитков статора $AWрот \approx 0{,}9 \times AWстат$ (точнее расчет по аналогии подсчета статорных ампервитков).

33. Намагничивающий ток фазы:

$$I\mu = \frac{2{,}22 \times AWо \times p}{m1 \times W1 \times fw1}$$

для многофазного двигателя:

$$I\mu = \frac{0{,}74 \times AWо \times p}{W1 \times fw1} - для\ m1 = 3, \qquad I\mu = \frac{1{,}11 \times AWо \times p}{W1 \times fw1} - для\ m1 = 1$$

34. Ток холостого хода фазы:

$$Iо \approx 1{,}01 \div 1{,}05 \times I\mu \text{ для } m1 = 3$$

где больший коэффициент относится к двигателям небольшой мощности и малых чисел оборотов $Iо \approx 2 \times I\mu$ для $m1 = 1$.

35. Процентное отношение тока холостого хода:

$$i\% = \frac{Iо}{Iн} \times 100\%, i\% \approx 20 \div 95 \text{ (см. табл. 26)}.$$

Таблица 26. Таблица токов холостого хода в % в зависимости от мощности и числа оборотов двигателя.

$$i\% = \frac{I\text{о}}{I\text{н}} \times 100 = f\ (P, n)$$

P, квт. / об/мин	3000	1500	1000	750	600	500
От 0,1 до 0,5	60	75	85	90	95	–
От 0,51 до 1	50	70	75	80	85	90
От 1,1 до 5	45	65	70	75	80	85
От 5,1 до 10	40	60	65	70	75	80
От 10,1 до 25	30	55	60	65	70	75
От 25,1 до 50	20	50	55	60	65	70
От 50 до 100	–	40	45	50	55	60

36. Подведенная (кажущаяся) мощность двигателя:

$$P\text{к} = \sqrt{3} \times U\text{л} \times I\text{л} \times 10^{-3}\ \text{ква}$$

или $P\text{к} = 3 \times U\text{ф} \times I\text{ф} \times 10^{-3}$для трехфазных, $P\text{к} = U \times I \times 10^{-3}$– для однофазных.

37. Номинальная мощность двигателя или полезная (активная):

$$P = P\text{к} \times cos\varphi \times \eta\ \ \text{квт}$$

где: $cos\ \varphi$ и η подбираются по табл. 25 (ориентировочно по Pк, а затем уточняются по P).
38. Проверка мощности двигателя:

$$P = \frac{ai \times AS \times Bl \times D_i^2 \times li \times n1 \times \eta \times cos\varphi}{6 \times 10^{11}}\ \ \text{квт}$$

39. Число оборотов двигателя при нагрузке получающееся из условия

$$n2 = n1 \times \left(1 - \frac{s\%}{100}\right)\ \text{об. мин.}$$

где s% – коэффициент скольжения, находится обычно для нормальных двигателей в пределах s%= 1,5 ÷ 6%, где меньшее значение соответствует большим двигателям, а большее–малым двигателям; $n2$ – число оборотов ротора; $n1$ – число оборотов в минуту магнитного вращающегося поля (синхронное число оборотов).

Коэффициент скольжения можно определить по формуле:

$$s\% = \frac{p\text{м}2}{P + p\text{м}2 + p\rho} \times 100$$

где pм2 – потери в меди ротора; $p\rho$ – потери механические; P – номинальная мощность двигателя.
40. Проверка диаметра конца вала по мощности и числу оборотов двигателя:

$$d\text{в} \approx 19{,}5 \div 25 \times \sqrt[3]{\frac{P}{n1}}$$

41. Вес обмотки статора и ротора:

$$G\text{м}1 = 9{,}35 \times z1 \times N\text{п. эл}1 \times l1\text{обм. ср} \times s\text{м}1\text{эл} \times 10^{-5} \ \text{кг}$$

$$G\text{м}2 = 9{,}35 \times z2 \times N\text{п. эл}2 \times l2\text{обм. ср} \times s\text{м}2\text{эл} \times 10^{-5} \ \text{кг}$$

где:

$$l1{,}2\text{обм. ср} = ls1{,}2\text{ср} + l1{,}2 \quad \text{см.}$$

$$ls1\text{ср} = k\text{р} \times \beta 1 \times \frac{\pi \times (Di + h\text{п}1)}{2p} \quad ls2\text{ср} = k\text{р} \times \beta 2 \times \frac{\pi \times (D2 + h\text{п}2)}{2p}$$

(значение kр см. §25).

52. Выбор соотношения чисел пазов на полюс–фазу статора и ротора.

Число пазов на полюс и фазу q является весьма характерной величиной машины, так как указывает не только на электрические, но и механические качества. Чем меньше q, тем выше обмоточный коэффициент fw, но конструктивно увеличивает размеры машины. Так как поверхность охлаждения у большего числа катушек выше, чем в одной катушке, то нагрев у последней будет гораздо выше. Зато при q >1 проигрываем в э. д. с., одновременно выигрывая в размерах машины, в коэффициенте самоиндукции и в результате в cos φ и в охлаждении. Но весьма большое число пазов на полюс и фазу подбирать не рекомендуется, потому что увеличивается расход на изоляцию и ухудшается использование машины. Соотношения чисел пазов на полюс–фазу статора и ротора также влияют на свойства машины. При расчете необходимо придерживаться следующих соотношений чисел пазов на полюс–фазу статора и ротора:
а) Для фазного ротора:

$$\frac{q2}{q1} = 0{,}7 \div 0{,}9 \ \text{ или } \ \frac{q2}{q1} = 1{,}15 \div 1{,}3 \ \text{ при } \tau = 15 \div 25 \text{ см} \quad q2 > q1$$

$$\text{при } \tau = 25 \div 35 \text{ см. } \ q2 > q1 \text{ и } q2 < q1 \text{ практически равноценны, при } \tau > 35 \ q2 < q1$$

Эти пределы дают оптимальные значения потерь в активной стали, меди и реактивности, а следовательно, cos φ, поэтому решающим является величина полюсного деления τ. Как показывает опыт, для уменьшения реактивности и стоимости машины необходимо делать $q2 > q1$, а для снижения потерь в активной стали – $q2 < q1$
б) Для короткозамкнутого ротора:

$$\frac{q2}{q1} = 1 \div 1{,}2 \text{ при } \tau < 25 \text{ см. } \ \frac{q2}{q1} = 0{,}85 \div 1{,}1 \ \text{ при } \tau > 25 \text{ см.}$$

Если число пазов выбрать меньше указанных пределов, то увеличивается реактивность рассеяния, при большем числе растут потери в активной стали и потери, вызванные вихревыми токами в беличьей клетке. Чтобы избежать шума машины, провалы кривой вращающего момента, вызванные высшими гармониками, а, следовательно, осуществить машину пригодной к эксплуатации, целесообразно выдержать следующие условия:

$$z1 - z2 \neq (2p \pm 1) \ \text{ или } \ z1 - z2 \neq p, 2p, 4p \text{ и т. д.}$$

Рекомендуется при расчетах асинхронного двигателя избегать равенства $q1 = q2$ (равенства $z1 = z2$), во избежание явления так называемого "прилипания".

По первому уравнению:

$$z2 \leq 1{,}25 \times (z1 + p)$$

при котором асинхронные моменты, ничтожно малы.
По второму уравнению:

$$z2 \leq 1{,}25 \times (z1 + y \times p)$$

где: y = 1 для обычных двигателей и y = 0 для реверсивных.

53. Примеры приближенного расчета асинхронных двигателей.

А. Поверочный расчет трехфазного асинхронного двигателя с контактными кольцами.

1. Данные для поверочного расчета двигателя без паспорта и обмоток:
а) номинальное линейное напряжение статора Uл = 380 *в*.
б) номинальное число оборотов (синхронное) $n1$ = 1000 *об. мин.*
в) частота тока сети f = 50 *гц*.
г) число фаз статора $m1$ = 3.
д) наружный диаметр статора/ротора:

$$\frac{D1\text{н}}{D2\text{н}} = \frac{395}{238{,}9} \text{ мм.}$$

е) внутренний диаметр статора/ротора:

$$\frac{Di}{D\text{вн}} = \frac{240}{141} \text{ мм.}$$

ж) длина активной стали статора:

$$l1 = l + ns \times bs = 245 + 2 \times 10 \text{ мм.}$$

з) размеры паза статора/ротора:

$$\frac{b\text{п1ср} \times h\text{п1}}{b\text{п2ср} \times h\text{п2}} = \frac{9{,}15 \times 23{,}8}{6 \times 21} \text{ мм}^2$$

и) размеры зубца статора/ротора:

$$\frac{bz1\text{мин}}{bz2\text{мин}} \times \frac{bz1\text{макс}}{bz2\text{макс}} = \frac{6{,}15 \times 6{,}15}{4 \times 4{,}4} \text{ мм.}$$

к) ширина прорези статора/ротора:

$$\frac{b\text{прор1}}{b\text{прор2}} = \frac{3}{2} \text{ мм.}$$

л) высота спинки статора/ротора:

$$\frac{ha1}{ha2} = \frac{23{,}7}{25} \text{ мм.}$$

м) толщина динамной стали:

$$\frac{\Delta\text{ст1}}{\Delta\text{ст2}} = \frac{0{,}5}{0{,}5} \text{ мм.}$$

н) число пазов:

$$\frac{\text{статора } z1}{\text{ротора } z2} = \frac{54}{72}$$

о) воздушный зазор, между статором и ротором δ = 0,55 *мм*.
п) диаметр конца вала dв = 45 *мм*.
2. Соединение фаз статора △/Y:

$$U\text{л} = 380 \text{ в } Y(\text{звезда}) \text{ и } U\text{л} = 220 \text{ в } \triangle \text{ (треугольник)}$$

3. Число пар полюсов:

$$p = \frac{60 \times f}{n1} = \frac{60 \times 50}{1000} = 3\ (2p = 6)$$

4. Число пазов статора на полюс и фазу:

$$q1 = \frac{z1}{2p \times m1} = \frac{54}{6 \times 3} = 3$$

5. Число пазов ротора на полюс и фазу:

$$q2 = \frac{z2}{2p \times m2} = \frac{72}{6 \times 3} = 4$$

6. Зубцовое деление статора и ротора по коронкам зубцов:

$$t1 = \frac{\pi \times Di}{z1} = \frac{3{,}14 \times 24}{54} = 1{,}4 \text{ см.} \qquad t2 = \frac{\pi \times D2\text{н}}{z2} = \frac{3{,}14 \times 23{,}89}{72} = 1{,}04 \text{ см.}$$

7. Полюсное деление:

$$\tau = \frac{\pi \times Di}{2p} = \frac{3{,}14 \times 24}{6} = 12{,}6 \text{ см.}$$

и окружная скорость $v = \tau$ = 12,6 *м/сек*. при f = 50 *гц*.
8. Сечение расточки статора в воздушном зазоре:

$$sl = ai \times \tau \times li = 0{,}69 \times 12{,}6 \times 25{,}5 = 220 \text{ см}^2$$

задаемся:

$$a1 = 0{,}69, \quad li = \frac{l1 + l}{2} = \frac{26{,}5 + 24{,}5}{2} = 25{,}5 \text{ см.}$$

9. Удвоенное сечение спинок статора и ротора:

$$2sa1 = 2 \times k\text{ст}1 \times l \times ha1 = 2 \times 0{,}95 \times 24{,}5 \times 2{,}37 = 110 \text{ см}^2$$

$$2sa2 = 2 \times k\text{ст}2 \times l \times ha2 = 2 \times 0{,}95 \times 24{,}5 \times 2{,}5 = 115 \text{ см}^2$$

$$ha1 = \frac{D\text{н}1 - Di}{2} - h\text{п}1 = \frac{33{,}5 - 24}{2} - 2{,}38 = 2{,}37 \text{ см.}$$

10. Шаги обмотки по пазам статора:

$$y\text{п}1 = \frac{z1}{2p} = \frac{54}{6} = 9\ (1 - 8) \quad \text{(двухслойная секционная обмотка)}$$

$$y'п1 \approx 0{,}8 \times yп1 = 0{,}8 \times 9 = 7{,}2 = 7\ (1 - 8)$$

$$\beta 1 = \frac{y'п1}{yп1} = \frac{7}{9} = 0{,}78$$

11. Число катушечных групп статора и ротора:

$$nк1 = 2р \times m1 = 6 \times 3 = 18 \text{ (двухслойная секционная обмотка)}$$

$$nк2 = p \times m2 = 3 \times 3 = 9 \text{ (простая катушечная).}$$

12. Обмоточный коэффициент обмотки статора и ротора:

$$fw1 = fa1 \times fк1 = \frac{sin\frac{\pi}{2 \times m1}}{q1 \times sin\frac{\pi}{2 \times m1 \times q1}} \times \sin(90° \times \beta 1) =$$

$$= \frac{sin\frac{180°}{2 \times 3}}{3 \times sin\frac{180°}{2 \times 3 \times 3}} \times \sin(90° \times 0{,}78) = \frac{\sin 30°}{3 \times \sin 10°} \times \sin(90° \times 0{,}78) =$$

$$= 0{,}96 \times 0{,}94 = 0{,}902$$

$$fw1 = 0{,}902$$

для ротора:

$$fw2 = fa2 \times fк2 = \frac{sin\frac{180°}{2 \times 3}}{4 \times sin\frac{180°}{2 \times 3 \times 4}} \times 1 = 0{,}958$$

Значения обмоточных коэффициентов см. табл. 12а.
13. Электромагнитные нагрузки. Задаемся по табл. 7, 22 и 23
$\Delta 1 = 5\ а/мм^2$ (плотность тока в обмотке статора);
$\Delta 2 = 6{,}7\ а/мм^2$ (плотность тока в обмотке ротора);
$Bl = 6400\ гс$ (максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре).
14. Магнитный поток двигателя при холостом ходе:

$$Фо = Bl \times s1 = 6400 \times 220 = 1{,}4 \times 10^6$$

15. Число эффективных витков на фазу статора:

$$W1 = \frac{Uф1 \times 10^8}{4{,}44 \times fw1 \times f \times Фо} = \frac{220 \times 10^8}{4{,}44 \times 0{,}902 \times 50 \times 1{,}4 \times 10^6} = 78{,}5$$

16. Число эффективных проводов в пазу статора:

$$Nп1эфф = \frac{2 \times 3 \times 78{,}5}{54} = 8{,}7$$

Берем соединение катушечных групп в 3 параллельные ветви (a = 3).
17. Число элементарных проводов в пазу статора:

$$Nп1эл = Nп1эфф \times a \times a1 = 8{,}7 \times 3 \times 1 \approx 26$$

18. Число эффективных витков в фазе ротора:

$$W2 = W1 \times \frac{fw2 \times U\text{ф}2}{fw1 \times U\text{ф}1} = 78{,}5 \times \frac{0{,}958}{0{,}902} \times \frac{168}{220} = 63{,}5$$

$$\text{берем } U\text{л}2 = 290 \text{ в Y, тогда } U\text{ф}2 = 168 \text{ в.}$$

19. Число эффективных проводов в пазу ротора:

$$N\text{п}2\text{эфф} = \frac{2 \times m2 \times W2}{z2} = \frac{2 \times 3 \times 63{,}5}{72} = 5{,}3$$

$$\text{берем } N\text{п}2\text{эфф} = 5 \times W2\text{действ} = \frac{5}{5 \times 3} \times 63{,}5 = 60 \text{ витков}$$

$$N\text{п}2\text{эл} = N\text{п}2\text{эфф} \times a2 \times a' = 5 \times 1 \times 1 = 5, N\text{п}2\text{эл} = 5$$

$$U\text{л}2\text{лдейств} = \frac{5}{5{,}3} \times 290 = 274 \text{ в}$$

20. Элементарное сечение обмотки статора, задаемся Ø 1,95 ПБД:

$$s\text{м}1\text{эл} = 0{,}785 \times d_2 = 0{,}785 \times 1{,}95^2 \approx 3 \quad \text{мм}^2$$

21. Коэффициент заполнения паза статора:

$$k\text{п}1 = \frac{s\text{м}1\text{из} \times N\text{п}1\text{эл}}{b\text{п}1\text{ср} \times h\text{п}1} = \frac{3{,}8 \times 26}{9{,}15 \times 23{,}8} = 0{,}45 \text{ где: } s\text{м}1\text{из} = 0{,}785 \times (1{,}95 + 0{,}25)^2 = 3{,}8 \text{ мм}^2$$

22. Фазовый ток статора:

$$I\text{ф}1 = a1 \times a \times s\text{м}1\text{эл} = 3 \times 1 \times 3 \times 5 = 45\ a$$

$$I\text{л}1 = I\text{ф}1 \quad \text{при Y}$$

23. Линейная нагрузка статора:

$$AS = \frac{I\text{ф}1 \times N\text{п}1\text{эфф}}{t1} = \frac{45 \times 8{,}7}{1{,}4} = 280 \text{ а/см.}$$

Сверяемся по табл. 22 и 23.

24. Фактор пропорционального перегрева обмотки статора $AS \times \Delta 1$:

$$\Delta t°C = AS \times \Delta 1 = 280 \times 5 = 1400$$

$$AS \times \Delta 1 < 1000 - 2200 \text{ (см. §43).}$$

25. Фазовый ток ротора:

$$I\text{ф}2 = 0{,}85 \div 0{,}9 \times I\text{ф}1 \times \frac{m1 \times W1 \times fw1}{m2 \times W2 \times fw2} = 0{,}9 \times 45 \times \frac{3 \times 78{,}5 \times 0{,}902}{3 \times 60 \times 0{,}958} = 50\ a$$

26. Элементарное сечение обмотки ротора:

$$s\text{м}2\text{эл} = \frac{I\text{ф}2}{a2 \times a' \times \Delta 2} = \frac{50}{1 \times 1 \times 6{,}7} = 7{,}5 \text{ мм}^2$$

(диаметр 3,05 ПБД), задаемся $\Delta 2 = 6{,}7\ a/\text{мм}^2$.

27. Коэффициент заполнения паза ротора:

$$k\text{п}2 = \frac{s\text{м}2\text{из} \times N\text{п}2\text{из}}{b\text{п}2\text{ср} \times h\text{п}2} = \frac{0{,}785 \times 3{,}35^2 \times 5}{6 \times 21} = 0{,}35 \ \leq 0{,}38 \div 0{,}45 \ (d\text{из} = 3{,}05 + 0{,}3 = 3{,}35 \text{ мм.})$$

28. Максимальные индукции в зубцах статора и ротора:

$$Bz1\text{макс} = \frac{t1 \times Bl \times li}{k\text{ст}1 \times bz1\text{мин} \times l} = \frac{1{,}4 \times 6 \times 400 \times 25{,}5}{0{,}95 \times 0{,}615 \times 24{,}5} = 16000 \text{ гс}$$

$$Bz2\text{макс} = \frac{t2 \times Bl \times li}{k\text{ст}2 \times bz2\text{мин} \times l} = \frac{1{,}04 \times 6 \times 400 \times 25{,}5}{0{,}95 \times 0{,}4 \times 24{,}5} = 18300 \text{ гс}$$

где:

$$t2 = \frac{\pi \times D2\text{н}}{z2} = \frac{3{,}14 \times 23{,}89}{72} = 1{,}04 \text{ см.}, \qquad D2 = Di - 2 \times \delta = 24 - 2 \times 0{,}055 = 23{,}89 \text{ см.}$$

29. Минимальная и средняя индукции в зубце статора:
Так как $bz1$мин = $bz1$макс = $bz1$ср то:

$$Bz1\text{макс} = Bz1\text{мин} = Bz1\text{ср} = 16000 \ гс$$

30. Индукции в спинках статора и ротора:

$$Ba1 = \frac{\Phi\text{о}}{2 \times sa1} = \frac{1{,}4 \times 10^6}{110} = 12700 \text{ гс} \qquad Ba2 = \frac{\Phi\text{о}}{2 \times sa1} = \frac{1{,}04 \times 10^6}{115} = 12200 \text{ гс}$$

31. Коэффициент воздушного зазора:

$$k\text{с} = k\text{с}1 \times k\text{с}2 = \left(\frac{t1 + 10 \times \delta}{bz1 + 10 \times \delta}\right) \times \left(\frac{t2 + 10 \times \delta}{bz2 + 10 \times \delta}\right) =$$
$$= \left(\frac{1{,}4 + 10 \times 0{,}055}{1{,}1 + 10 \times 0{,}055}\right) \times \left(\frac{1{,}04 + 10 \times 0{,}055}{0{,}84 + 10 \times 0{,}055}\right) = \frac{1{,}95}{1{,}65} \times \frac{1{,}59}{1{,}39} = 1{,}36$$

где:

$$bz1 = t1 - b\text{прор}1 = 1{,}4 - 0{,}3 = 1{,}1 \text{ см.}$$
$$bz2 = t2 - b\text{прор}2 = 1{,}04 - 0{,}2 = 0{,}84 \text{ см.}$$

32. Суммарные ампервитки двигателя или ампервитки холостого хода:

$$AW\text{о} = \Sigma AW = AWl + AW\text{стат} + AW\text{рот} = 383 + 157 + 141 = 681$$

где:

$$AWl = 0{,}8 \times k\text{с} \times \delta \times Bl = 0{,}8 \times 1{,}36 \times 0{,}055 \times 6400 = 383$$

где:

$$AW\text{стат} = AWz1 + AWa1 = 112 + 45 = 157$$

где:

$$AWz1 = h\text{п}1 \times \left(\frac{awz\text{макс} + awz\text{мин} + 4 \times awz\text{ср}}{6}\right)$$

но так как awzмакс = awzмин = awzср, то:

$$AWz1 = awz1 \times h\text{п}1 = 2{,}38 \times 47 = 112$$

$$AWa1 = awa1 \times La1 \times \gamma a1 = 11{,}6 \times 8{,}2 \times 0{,}47 = 45$$

где:

$$La1 = \frac{\pi \times (D\text{н} - ha1)}{4 \times p} = \frac{3{,}14 \times (33{,}5 - 2{,}37)}{4 \times 3} = 8{,}2 \text{ см.}$$

$$AW\text{рот} \approx 0{,}9 \times AW\text{стат} = 0{,}9 \times 157 = 141$$

33. Намагничивающий ток фазы:

$$I\mu = \frac{2{,}22 \times AW\text{о} \times p}{m1 \times W1 \times fw1} = \frac{2{,}22 \times 681 \times 3}{3 \times 78{,}5 \times 0{,}902} = 21\ a$$

34. Ток холостого хода фазы:

$$I\text{о} = 1{,}01 \div 1{,}05 \times I\mu = 1{,}03 \times 21 = 21{,}7\ a$$

35. Процентное отношение тока холостого хода:

$$i\% = \frac{I\text{о}}{I\text{н}} \times 100 = \frac{21{,}7}{45} = 48{,}5\%$$

36. Подведенная (кажущаяся) мощность двигателя:

$$P\text{к} = \sqrt{3} \times U\text{л} \times I\text{л} \times 10^{-3} = 1{,}73 \times 380 \times 45 \times 10^{-3} = 29{,}6 \text{ ква.}$$

37. Номинальная мощность двигателя или полезная (активная):

$$P = P\text{к} \times cos\varphi \times \eta = 29{,}6 \times 0{,}85 \times 0{,}88 = 22{,}5 \text{ квт.}$$

где η = 0,88 и $cos\ \varphi$ = 0,85 берем по табл. 25.
38. Проверка мощности двигателя:

$$P = \frac{ai \times AS \times Bl \times D_i^2 \times li \times n1 \times \eta \times cos\varphi}{6 \times 10^{11}} =$$

$$= \frac{0{,}69 \times 280 \times 6400 \times 24^2 \times 25{,}5 \times 1000 \times 0{,}88 \times 0{,}85}{6 \times 10^{11}} = 22{,}5 \text{ квт}$$

39. Число оборотов двигателя при нагрузке:

$$n2 = n1 \times \left(1 - \frac{s\%}{100}\right) = 1000 \times \left(1 - \frac{3\%}{100}\right) = 970 \text{ об. мин.}$$

40. Проверка диаметра конца вала по мощности и числу оборотов двигателя:

$$d\text{в} \approx 19{,}5 \div 25 \times \sqrt[3]{\frac{P}{n1}} = 22 \times \sqrt[3]{\frac{22{,}5}{1000}} = 22 \times \frac{1{,}68}{10} = 3{,}7 \text{ см.}$$

по замерам dв = 45 *мм*., что вполне удовлетворительно.
41. Вес обмотки статора и ротора:

$$G\text{м}1 = 9{,}35 \times z1 \times N\text{п. эл}1 \times l1\text{обм. ср} \times s\text{м}1\text{эл} \times 10^{-5} = 9{,}35 \times 54 \times 26 \times 45{,}5 \times 3 \times 10^{-5} = 18 \text{ кг.}$$

где:

$$l\text{обм1ср} = l1 + k\text{р} \times \beta 1 \times \frac{\pi \times (Di + h\text{п1})}{2p} = 26{,}5 + 1{,}75 \times 0{,}78 \times \frac{3{,}14 \times (24 + 2{,}38)}{6} =$$

$$= 26{,}5 + 19 = 45{,}5 \text{ см.}$$

и ротора:

$$G\text{м2} = 9{,}35 \times z2 \times N\text{п. эл2} \times l2\text{обм. ср} \times s\text{м2эл} \times 10^{-5} = 9{,}35 \times 72 \times 5 \times 46{,}5 \times 7{,}3 \times 10^{-5} = 11{,}3 \text{ кг.}$$

где:

$$l\text{обм2ср} = l2 + k\text{р} \times \beta 2 \times \frac{\pi \times (Di - h\text{п1})}{2p} = 26{,}5 + 1{,}75 \times 1 \times \frac{3{,}14 \times (23{,}9 - 2{,}1)}{6} =$$

$$= 26{,}5 + 20 = 46{,}5 \text{ см.}$$

Б. Поверочный расчет однофазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

1. Данные для расчета однофазного двигателя с трехфазного завода "Электросила" тип И–10/4, 0,25 *квт.*, 127/220 *в*, 1410 *об. мин.*
а) Номинальное линейное напряжение $U\text{л} = 127$ *в*.
б) Номинальное число оборотов (синхронное) $n1 = 1500$ *об. мин.*
в) Частота тока сети $f = 50$ *гц*.
г) Число фаз статора $m1 = 1$.
д) Наружный диаметр статора/ротора:

$$\frac{D1\text{н}}{D2\text{н}} = \frac{126}{76{,}5} \text{ мм.}$$

е) Внутренний диаметр статора/ротора:

$$\frac{Di}{D\text{вн}} = \frac{77}{43{,}5} \text{ мм.}$$

ж) Длина активной стали/статора:

$$l1 = 50 \text{ мм.}$$

з) Размеры паза статора/ротора:

$$\frac{b\text{п1ср} \times h\text{п1}}{b\text{п2ср} \times h\text{п2}} = \frac{9 \times 16{,}3}{3{,}6 \times 8} \text{ мм}^2$$

и) Размеры зубца статора/ротора:

$$\frac{bz1\text{мин}}{bz2\text{мин}} \times \frac{bz1\text{макс}}{bz2\text{макс}} = \frac{3{,}3 \times 3{,}3}{3{,}4 \times 3{,}4} \text{ мм}^2$$

к) Ширина прорези статора/ротора:

$$\frac{b\text{прор1}}{b\text{прор2}} = \frac{2{,}6}{1{,}5} \text{ мм.}$$

л) Высота спинки статора/ротора:

$$\frac{ha1}{ha2} = \frac{7{,}2}{8} \text{ мм.}$$

м) Толщина динамной стали:

$$\frac{\Delta\text{ст}1}{\Delta\text{ст}2} = \frac{0{,}5}{0{,}5}\ \text{мм.}$$

н) Число пазов статора/ротора:

$$\frac{z1}{z2} = \frac{24}{31}$$

о) Воздушный зазор между статором и ротором δ = 0,25 *мм*.

п) Размеры площади поперечного сечения стержня и кольца:

$$s\text{м}2\text{эл} = 3{,}21 \times 6{,}42\ \text{мм.}\ \text{и}\ s\text{к} = 7 \times 7\ \text{мм.}$$

2. Число пар полюсов:

$$p = \frac{60 \times f}{n1} = \frac{60 \times 50}{1500} = 2\ \text{т.е.}\ 2p = 4$$

3. Зубцовое деление статора и ротора по коронкам зубцов:

$$t1 = \frac{\pi \times Di}{z1} = \frac{3{,}14 \times 7{,}7}{24} = 1\ \ \text{см.}$$

$$t2 = \frac{\pi \times D2\text{н}}{z2} = \frac{3{,}14 \times 7{,}65}{31} = 0{,}77\ \ \text{см.}$$

4. Полюсное деление:

$$\tau = \frac{\pi \times Di}{2p} = \frac{3{,}14 \times 7{,}7}{4} = 6\ \ \text{см.}\ \ \text{и}\ \ v = \tau = 6\ \ \text{м/сек.}$$

5. Сечение расточки статора в воздушном зазоре:

$$sl = ai \times \tau \times li = 0{,}645 \times 6 \times 5 = 19{,}4\ \text{см}^2$$

Берем ai = 0,645.

6. Удвоенное сечение спинок статора и ротора:

$$2sa1 = 2 \times k\text{ст}1 \times l \times ha1 = 2 \times 0{,}95 \times 5 \times 0{,}72 = 6{,}85\ \ \text{см}^2$$
$$2sa2 = 2 \times k\text{ст}2 \times l \times ha2 = 2 \times 0{,}95 \times 5 \times 0{,}8 = 7{,}6\ \ \text{см}^2$$

7. Число пазов рабочей и пусковой обмоток:

$$z\text{р} = \frac{2}{3} \times z = \frac{2}{3} \times 24 = 16, \qquad z\text{п} = \frac{1}{3} \times z = \frac{1}{3} \times 24 = 8, \qquad z = z\text{р} + z\text{п} - 16 + 8 = 24$$

8. Число пазов на полюс и фазу статора рабочей и пусковой обмоток:

$$q\text{р} = \frac{z\text{р}}{2p \times m1} = \frac{16}{4 \times 1} = 4\ (q\text{р} = 2\ \text{для полукатушечной обмотки})$$

$$q\text{п} = \frac{z\text{р}}{2p \times m1} = \frac{8}{4 \times 1} = 2\ (q\text{п} = 1\ \text{для полукатушечной обмотки})$$

9. Число пазов на полюс и фазу короткозамкнутого ротора:

$$q2 = \frac{z2}{2p \times m2} = \frac{z2}{2p \times \frac{z2}{p}} = \frac{1}{2}\ \ \text{где}\ m2 = \frac{z2}{p}$$

10. Число катушечных групп статора рабочей и пусковой обмоток:

$$n\text{к.р} = n\text{к.п} = 2p \times m1 = 4 \times 1 = 4$$

11. Обмоточный коэффициент обмоток статора и короткозамкнутого ротора:

$$fw1 = fa1 \times f\text{к}1 = \frac{0{,}865}{q1 \times sin\frac{60°}{q1}} \times \sin(90° \times \beta 1) = \frac{0{,}865}{4 \times sin\frac{60°}{4}} \times \sin(90° \times 1) =$$

$$= \frac{0{,}865}{4 \times sin\frac{60°}{4}} \times \sin 90° = \frac{0{,}868}{4 \times 0{,}259} \times 1 = 0{,}83$$

$$fw1 = 0{,}83$$

для ротора:

$$fw2 = \frac{sin\frac{\pi}{2 \times m2}}{q2 \times sin\frac{\pi}{2 \times m2 \times q2}} = \frac{sin\frac{180°}{2 \times \frac{z2}{p}}}{1/2 \times sin\frac{180°}{2 \times \frac{z2}{p} \times \frac{1}{2}}} = \frac{sin\frac{180° \times p}{2 \times z2}}{1/2 \times sin\frac{180° \times p}{z2}} = 1$$

12. Электромагнитные нагрузки. Выбираем по табл. 7 и 23. Δ1 = 6,5 *а/мм*², *Bl* = 5000 *гс*.
13. Магнитный поток двигателя при холостом ходе:

$$\text{Фо} = Bl \times sl = 5000 \times 19{,}4 = 0{,}097 \times 10^6 \text{ мкс.}$$

14. Число эффективных витков на фазу рабочей обмотки:

$$W\text{р} = \frac{U\text{ф}1 \times 10^8}{4{,}44 \times fw1 \times f \times \text{Фо}} = \frac{127 \times 10^8}{4{,}44 \times 0{,}83 \times 50 \times 0{,}097 \times 10^6} \approx 720$$

15. Число эффективных проводов в пазу статора рабочей обмотки:

$$N\text{п.р.эфф} = \frac{2 \times m1 \times W\text{р}}{zp} = \frac{2 \times 1 \times 720}{16} = 90$$

Число эффективных проводов в пазу статора пусковой обмотки:

$$N\text{п.п.эфф} = 2 \times N\text{п.р.эфф} = 180$$

16. Мощность двигателя:

$$P_I \approx 0{,}7 \times P_{III} = 0{,}7 \times 0{,}25 = 0{,}175 \text{ квт.}$$

Берем P_I = 0,15 *квт*.

17. Фазовый ток двигателя:

$$I\text{ф} = \frac{P_I}{U\text{ф} \times \eta \times cos\varphi} = \frac{0{,}15 \times 10^3}{127 \times 0{,}6 \times 0{,}65} = 3\ a$$

Задаемся η = 60%, *cos* φ= 0,65.

18. Элементарное сечение рабочей и пусковой обмоток:

$$s\text{м.р.эл} = \frac{I\text{ф}1}{\Delta 1} = \frac{3}{6{,}5} = 0{,}465 \text{ мм}^2, \qquad \text{диаметр } 0{,}77 \text{ ПЭБО}$$

$$s\text{м.п.эл} = 0{,}5 \times \ s\text{м.р.эл} = 0{,}5 \times 0{,}465 = 0{,}232 \text{ мм}^2, \qquad \text{диаметр } 0{,}51 \text{ ПЭБО}$$

19. Коэффициент заполнения паза статора:

$$k\text{пр} = \frac{s\text{м}1\text{из} \times N\text{п.эл}1}{b\text{п}1\text{ср} \times h\text{п}1} = \frac{0{,}68 \times 90}{9 \times 16{,}3} = 0{,}415 \leq 0{,}38 \div 0{,}45$$

где:

$$d\text{из} = 0{,}77 + 0{,}16 = 0{,}93 \text{ мм.}, \qquad s\text{м}1\text{из} = 0{,}785 \times 0{,}93^2 = 0{,}68 \text{ мм}^2$$

$$k\text{пп} = \frac{0{,}340 \times 180}{9 \times 16{,}3} = 0{,}42$$

$$d\text{из} = 0{,}51 + 0{,}15 = 0{,}66 \text{ мм.} \qquad s\text{м.п.из} = 0{,}785 \times 0{,}66^2 = 9{,}34 \text{ мм}^2$$

20. Линейная нагрузка статора:

$$AS = \frac{I\text{ф}1 \times N\text{п}1\text{эфф}}{t1} = \frac{3 \times 90}{1} = 270 \text{ а/см.}$$

21. Фактор пропорционального перегрева обмотки статора:

$$\Delta t°C = AS \times \Delta 1 = 270 \times 6{,}5 = 1750$$

что допустимо (см. §43).

22. Фазовый ток ротора:

$$I\text{ф}2 = 1{,}7 \div 1{,}8 \times I\text{ф}1 \times \frac{m1 \times W1 \times fw1 \times p}{z2} = 1{,}7 \times 3 \times \frac{1 \times 720 \times 0{,}83 \times 2}{31} = 196\ a$$

ток в стержне:

$$Is = \frac{I\text{ф}2}{p} = \frac{196}{2} = 98\ a$$

ток в короткозамкнутом кольце:

$$I\text{к} = \frac{Is}{2 \times sin \times \frac{\pi \times p}{z2}} = \frac{98}{2 \times \sin\frac{180° \times 2}{31}} = \frac{49}{\sin 11{,}6} = 225\ a$$

23. Плотность тока в стержне ротора и в короткозамкнутом кольце:

$$\Delta 2 = \frac{Is}{s\text{м}2\text{эл}} = \frac{98}{20{,}6} \approx 4{,}8 \ \text{ а/мм}^2$$

где:

$$s\text{м}2\text{эл} = 3{,}21 \times 6{,}42 = 20{,}6 \text{ мм}^2, s\text{к} = 7 \times 7 = 49 \text{ мм}^2, \Delta\text{к} = \frac{I\text{к}}{s\text{к}} = \frac{225}{49} \approx 4{,}6 \text{ а/мм}^2$$

24. Коэффициент заполнения паза ротора:

$$k\text{п}2 = \frac{s\text{м}2\text{эл} \times N\text{п}2\text{эл}}{b\text{п}2\text{ср} \times h\text{п}2} = \frac{20{,}6 \times 1}{3{,}6 \times 8} = 0{,}72$$

(для короткозамкнутого ротора).

25. Максимальная индукция в зубцах статора и ротора:

$$Bz1\text{макс} = \frac{t1 \times Bl \times li}{k\text{ст}1 \times bz\text{мин} \times l} = \frac{1 \times 5000 \times 5}{0{,}95 \times 0{,}33 \times 5} = 15800 \text{ гс}$$

так как:

$$bz1\text{мин} = bz1\text{макс} = bz1\text{ср} \text{ то: } Bz1\text{мин} = Bz\text{макс} = Bz\text{ср} = 15800 \text{ гс}$$

$$Bz2\text{макс} = \frac{t2 \times Bl \times li}{k\text{ст}2 \times bz2\text{мин} \times l} = \frac{0{,}77 \times 5000 \times 5}{0{,}95 \times 0{,}34 \times 5} = 11950 \text{ гс}$$

26. Индукция в спинках статора и ротора:

$$Ba1 = \frac{\Phi\text{о}}{2 \times sa1} = \frac{0{,}097 \times 10^6}{6{,}85} = 14200 \text{ гс}$$

и

$$Ba2 = \frac{\Phi\text{о}}{2 \times sa2} = \frac{0{,}097 \times 10^6}{7{,}6} = 12800 \text{ гс}$$

27. Коэффициент воздушного зазора:

$$k\text{c} = k\text{c}1 \times k\text{c}2 = \left(\frac{t1 + 10 \times \delta}{bz1 + 10 \times \delta}\right) \times \left(\frac{t2 + 10 \times \delta}{bz2 + 10 \times \delta}\right) =$$
$$= \left(\frac{1 + 10 \times 0{,}025}{0{,}74 + 10 \times 0{,}025}\right) \times \left(\frac{0{,}77 + 10 \times 0{,}025}{0{,}62 + 10 \times 0{,}025}\right) = \frac{1{,}25 \times 1{,}02}{0{,}99 \times 0{,}87} = 1{,}48$$

где:

$$bz1 = t1 - b\text{прор}1 = 1 - 0{,}26 = 0{,}74 \text{ см.}$$
$$bz2 = t2 - b\text{прор}2 = 0{,}77 - 0{,}15 = 0{,}62 \text{ см.}$$

28. Суммарные ампервитки или ампервитки холостого хода двигателя:

$$AW\text{о} = \Sigma AW = AWl + AW\text{стат} + AW\text{рот} = 148 + 82 + 74 = 304$$

$$AWl = 0{,}8 \times k\text{c} \times \delta \times Bl = 0{,}8 \times 1{,}48 \times 0{,}025 \times 5000 = 148$$

$$AW\text{стат} = AWz1 + AWa1 = 67 + 15 = 82$$

$$AWz1 = awz1 \times h\text{п}1 = 41 \times 1{,}63 = 67$$

$$\text{при } bz\text{макс} = bz\text{мин} = bz\text{ср}$$

$$AWa1 = awa1 \times La1 \times \gamma a1 = 2{,}1 \times 20{,}6 \times 0{,}35 = 15$$

$$La1 = \frac{\pi \times (D\text{н} - ha1)}{4 \times p} = \frac{3{,}14 \times (12{,}6 - 7{,}2)}{4 \times 2} = 2{,}1 \text{ см.}$$

$$AW\text{рот} \approx 0{,}9 \times AW\text{стат} = 0{,}9 \times 82 \approx 74$$

29. Намагничивающий ток фазы:

$$I\mu = \frac{1{,}11 \times \Sigma AW \times p}{m1 \times Wp \times fw1} = \frac{1{,}11 \times 304 \times 2}{1 \times 720 \times 0{,}83} \approx 1{,}13\ a$$

30. Ток холостого хода фазы:

$$I\text{о} \approx 2 \times I\mu = 2 \times 1{,}13 \approx 2{,}3\ a$$

31. Процентное отношение тока холостого хода:

$$i\% = \frac{I\text{о}}{I\text{н}} \times 100 = \frac{2{,}3 \times 100}{3} = 77\%$$

32. Проверка мощности двигателя:

$$P = \frac{ai \times AS \times Bl \times D_i^2 \times li \times n1 \times \eta \times cos\varphi}{6 \times 10^{11}} =$$

$$= \frac{0{,}645 \times 180 \times 5000 \times 7{,}7^2 \times 50 \times 1500 \times 0{,}6 \times 0{,}65}{6 \times 10^{11}} = 0{,}166\ \text{квт}$$

так как $P \approx P_{\text{I}}$ = 0,15 *квт.*, то расчет верен.

33. Коэффициент скольжения:

$$s\%_I \approx 2 \times s\%_{III} = 2 \times \frac{1500 - 1410}{1500} \times 100 = 12\%$$

34. Число оборотов двигателя при нагрузке:

$$n2 = n1 \times \left(1 - \frac{s\%}{100}\right) = 1500 \times \left(1 - \frac{12}{100}\right) = 1320\ \text{об.мин.}$$

35. Вес обмотки статора и ротора.

вес рабочей обмотки статора:

$$G\text{мр} = 9{,}35 \times z\text{р} \times N\text{п.эл.р} \times l\text{обм1.ср} \times s\text{м.р.эл} \times 10^{-5}$$
$$= 9{,}35 \times 16 \times 90 \times 17 \times 0{,}465 \times 10^{-5} \approx 1{,}1\ \text{кг.}$$

где:

$$l\text{обм1ср} = l1 + k\text{р} \times \beta1 \times \frac{\pi \times (Di + h\text{п}1)}{2p} = 7{,}7 + 1{,}15 \times 0{,}835 \times \frac{3{,}14 \times (7{,}7 + 1{,}63)}{4} =$$

$$= 7{,}7 + 9{,}2 \approx 17\ \text{см.}$$

вес пусковой обмотки статора:

$$G\text{мп} = 9{,}35 \times z\text{п} \times N\text{п.п.эл.} \times l\text{обм1.ср} \times s\text{м.п.эл} \times 10^{-5}$$
$$= 9{,}35 \times 8 \times 180 \times 17 \times 0{,}232 \times 10^{-5} \approx 0{,}55\ \text{кг.}$$

вес стержней ротора:

$$G\text{м2} = 8{,}9 \times z2 \times N\text{п2.эл.} \times l\text{обм2} \times s\text{м2} \times 10^{-5} = 8{,}9 \times 31 \times 1 \times 8{,}7 \times 20{,}6 \times 10^{-5}$$
$$\approx 0{,}5\ \text{кг.}$$